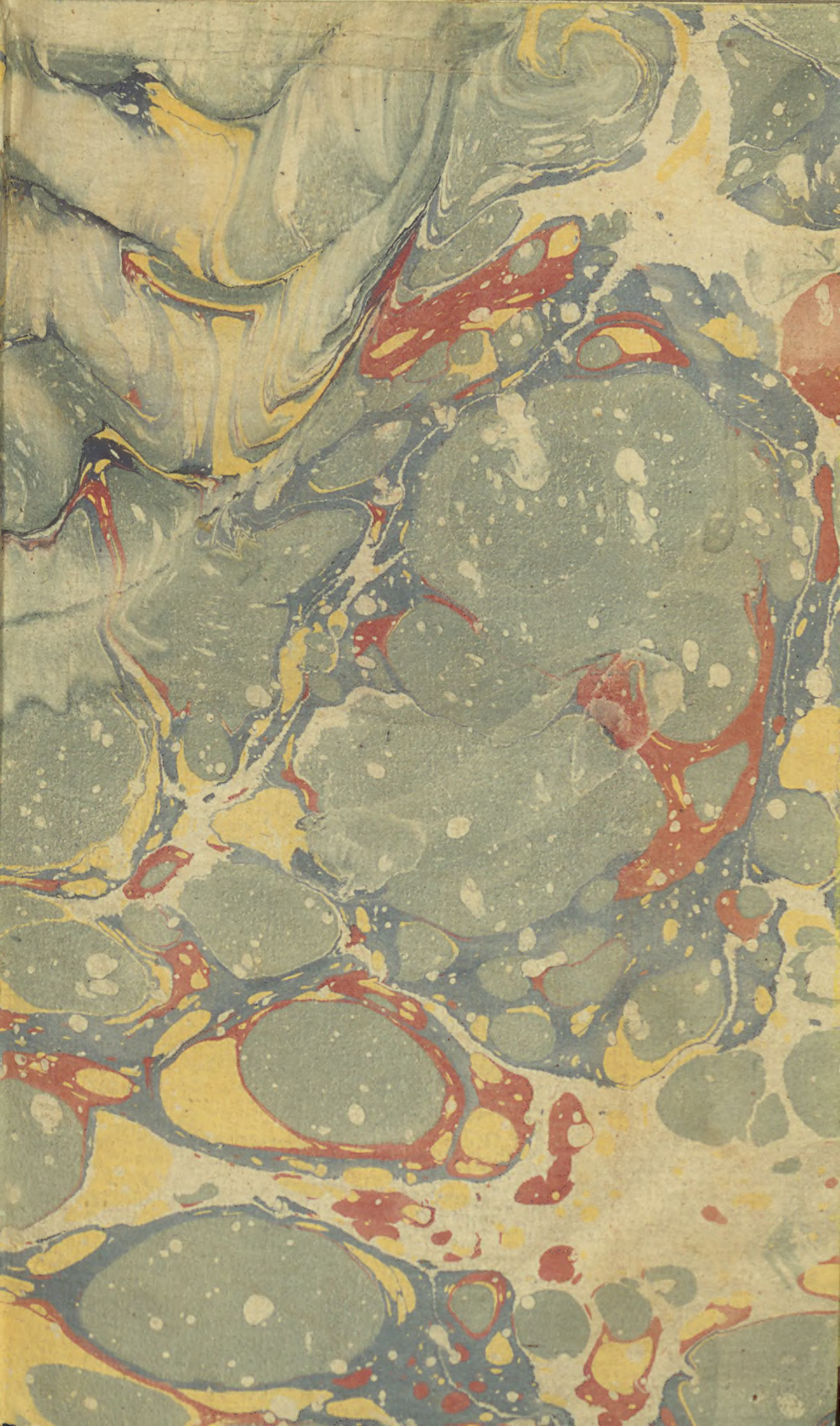
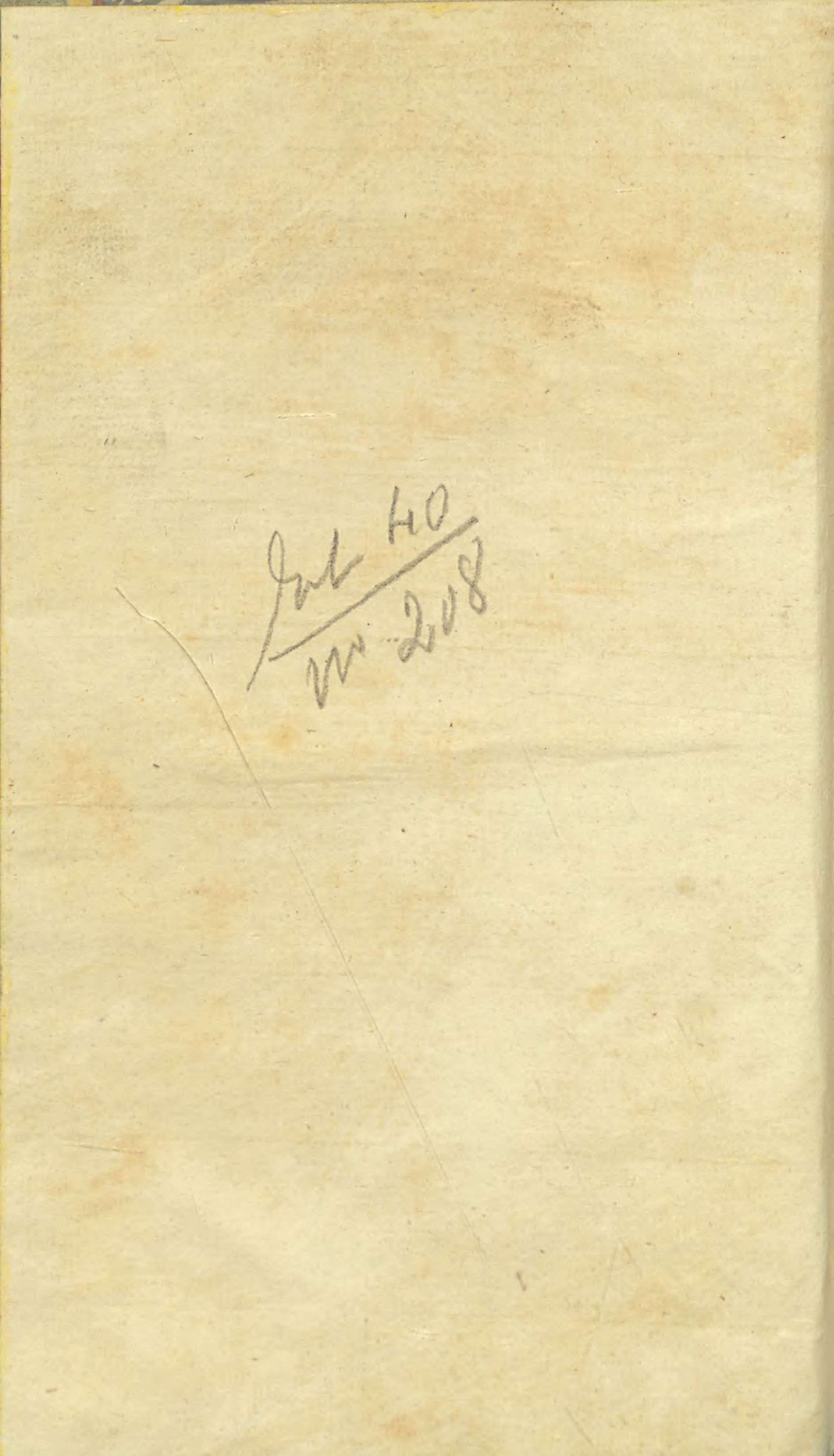







40
208

TRATADO DE FÍSICA
ESPERIMENTAL.

TRATADO DE FÍSICA
ESPERIMENTAL

POR J. B. BIOT.

DESTINADO POR DECRETO DE LA COMISION DE INSTRUCCION PÚBLICA DE 22 DE FEBRERO DE 1817 PARA LA ENSEÑANZA EN TODAS LAS CÁTEDRAS DE FÍSICA DEL REINO DE FRANCIA;

TRADUCIDO

POR D. FRANCISCO GRIMAUD DE VELAUNDE,
Individuo de varias Corporaciones científicas y literarias peninsulares y estrangeras, y Discípulo de física de MM. Gay-Lussac, Biot y Tremery, Profesores en la Facultad de Ciencias, y en el Ateneo de Paris.

TOMO TERCERO.

MADRID.

IMPRENTA DE REPULLÉS, *plazuela del Angel.*

AÑO 1826.

TRATADO ELEMENTAL
DE FÍSICA.

LIBRO QUINTO.

DEL MAGNETISMO.

CAPÍTULO PRIMERO.

Fenómenos generales de las atracciones y repulsiones magnéticas.

Casi todos los pedazos de mineral de hierro en que este metal se halla poco oxidado, tienen al retirarlos de la tierra la singular propiedad de atraer el hierro con una fuerza invisible. Muchas veces esta atraccion es tan débil, que es preciso emplear métodos muy delicados para conocerla; pero otras es tan enérgica, que levanta pesos muy considerables. Entonces el mineral toma el nombre de *iman*, en griego μαγνης; de donde se ha formado la voz *magnetismo* para designar los fenómenos de atraccion que produce el diamante.

Si se envuelve un pedazo de iman en limaduras de hierro, sacándole de ellas en seguida, se observa que dichas limaduras no se adhieren por igual á todos los puntos de su superficie, sino que se acumula principalmente en dos puntos opuestos N S, fig. 1. Estos puntos se llaman los polos del iman. Para ob-

servar mas fácilmente sus propiedades, supondremos que se labran en él dos caras planas y paralelas A B, fig. 2, en una direccion mas ó menos perpendicular á la mayor atraccion. Entonces se observan los fenómenos siguientes:

Cada polo, presentado de lejos á las limaduras de hierro, las atrae *á cierta distancia*, como un tubo de lacre electrizado atraeria los cuerpecillos ligeros que se le presentasen. Si se cuelga horizontalmente una agujita de hierro ó acero de un hilo de lino, seda ó cualquiera otra materia flexible, de modo que tenga una entera libertad en sus movimientos, cada polo del iman la atraerá del mismo modo y podrá hacerla dar vueltas sobre su centro. Esta facultad se verifica indistintamente atravesando las sustancias que conducen ó no la electricidad: el agua, el vidrio, el papel, la llama, no interceptan su accion; el aislamiento no es necesario, y el iman nada pierde aunque se le toque.

Si se pone en contacto sucesivamente la superficie polar A de un iman con las superficies polares A′ y B′ de otro, se ve que atrae una de ellas B′ y repele á la otra A′, y recíprocamente la superficie polar B del primer iman atrae á A′ y rechaza á B.′ La tendencia mútua de las superficies que se atraen se manifiesta, no solo por la adherencia que contraen cuando se tocan, sino tambien por el esfuerzo que hacen conocer cuando se hallan próximas á tocarse. La repulsion seria mas dificil de reconocer de este modo; pero se hace sensible colocando uno de los imanes sobre una tablita que se deja flotar sobre el agua; pues en este caso, pudiéndose mover libremente, luego que se presenta el otro iman se acerca ó separa, segun es atraida ó rechazada. Estos fenómenos nos hacen ver que hay dos especies de magnetismo, como sucede con la electricidad, y que cada uno de ellos domina en uno de los polos del iman, como cada electricidad en uno de los polos de una pila eléctrica.

Si se observan los penachos formados por las limaduras de hierro que se adhieren á los polos de los imanes, se nota que cada uno de sus rayos se compone de muchas partículas que se adhieren unas á otras por los estremos. Este fenómeno es muy digno de atencion, pues nos demuestra que el hierro puesto en contacto con el iman adquiere las propiedades magnéticas, como un cuerpo aislado se hace eléctrico cuando se halla en presencia de un cuerpo electrizado.

Para hacer evidente esta propiedad se toman varias barras de hierro *dulce*, es decir, ductil y maleable, como por ejemplo, el que usan los cerrageros para construir las llaves. Despues de asegurarse de que ninguna de estas barras posee un magnetismo sensible, se cuelga una de ellas *ab*, fig. 3, de uno de los polos B de un iman, y al momento el estremo inferior *b* de esta barra adquiere las propiedades magnéticas. Si se la mete entre limaduras de hierro, estas se adherirán á ella; y aun se podrá suspender de ella una segunda barra, de esta una tercera, y asi sucesivamente, como representa la fig. 3, adhiriéndose unas á otras hasta que el peso total esceda del que puede sufrir el iman. En este caso se desprenderá la primera barra *ab*, y todas se separarán unas de otras; de modo que si se trata de reunirlas de nuevo no serán capaces de sostenerse mútuamente. Sin embargo, conservarán generalmente algunos restos de magnetismo, que se conocerán metiéndolas en limaduras de hierro, ó presentándolas á las agujas de este mismo metal que se hallen colgadas libremente. Esta comunicacion pasagera del magnetismo se verifica aun si la primera barra se acerca mucho al iman sin tocarle; pero entonces el peso total que puede sostenerse es menor que en el caso de contacto; lo cual manifiesta que la atraccion magnética se disminuye con la distancia.

Si en vez de hierro dulce se emplean barras de acero ó de hierro batido, la adherencia de las bar-

ras entre sí se verifica con mas lentitud, pero es mas durable; y las barras separadas del iman conservan el magnetismo que han adquirido por el contacto.

El hierro dulce y el acero obran en estas esperiencias como una varilla metálica y una barra de lacre bajo la influencia de un cuerpo electrizado. En el metal la descomposicion de las electricidades naturales es repentina, pero su recomposicion lo es igualmente, y se verifica al momento que se separa el metal del influjo del cuerpo electrizado; en la resina, por el contrario, se separan difícilmente las electricidades naturales; pero cuando llegan á separarse encuentran la misma dificultad para su reunion, y el estado eléctrico subsiste despues que ha dejado de obrar el cuerpo electrizado.

Puede comunicarse el magnetismo á una barra de acero de un modo mas pronto y enérgico, valiéndose de dos imanes, y poniendo á la vez sus dos estremos en contacto con los polos que los atraen. Unos mismos imanes pueden magnetizar asi sucesivamente muchas barras de acero sin perder nada de su virtud primitiva; lo cual prueba que nada comunican á estas barras, sino que solo desenvuelven en ellas por su influencia algun principio que se halla disimulado, asi como una barra de lacre no pierde su electricidad por las descomposiciones que produce su influjo á distancia en las electricidades naturales de otros cuerpos.

Si habiendo magnetizado de este modo una barra ó un hilo de acero se le suspende horizontalmente en un aparato cuya torsion sea insensible, ó se le hace flotar sobre el agua colocándole sobre una tablita, no se coloca indiferentemente en cualquiera direccion del espacio, sino que toma una determinada, que es poco mas ó menos la de la línea norte-sur. Digo poco mas ó menos, porque en ciertos parages de la tierra, el estremo norte de la barra se separa hácia el oeste, en otros hácia el este, y en

algunos coincide con la meridiana. Esta separacion se llama *declinacion de la aguja magnetizada.* Es constante en el mismo momento en cada punto de la tierra, de modo que todas las barras magnetizadas, colocadas libremente, toman direcciones paralelas; pero esta direccion comun varía con el tiempo, conforme á las leyes que esplicaremos mas adelante deduciéndolas de la esperiencia. El plano vertical en que se coloca la aguja magnetizada en cada sitio se llama *meridiano magnético*, porque en general se separa muy poco del meridiano astronómico.

Cuando se cuelgan de este modo libremente y en una situacion horizontal muchos hilos magnetizados, los estremos que se dirijen hácia un mismo polo de la tierra son los que al tiempo de la magnetizacion han estado en contacto con un mismo polo magnético, y por consiguiente han recibido un magnetismo de la misma naturaleza. Si se acercan estos estremos unos á otros se ve que se rechazan mútuamente, y por el contrario, si se acercan los estremos que han recibido diferentes magnetismos se nota que se atraen entre sí; en lo cual los dos magnetismos obran exactamente como las dos electricidades.

Si se presenta de lejos uno de los polos de un iman á una aguja magnetizada, colgada por su centro, y equilibrada de modo que se mantenga en una posicion horizontal, los dos polos del iman obran á un mismo tiempo sobre la aguja; pero es siempre mayor la accion del polo mas inmediato: la aguja aproxima, pues, hácia el iman el polo que este atrae, y separa el que rechaza. Luego que ha tomado de esta manera una posicion de equilibrio, si se la hace tomar otra vuelve á la primera por medio de una serie de oscilaciones, del mismo modo que un péndulo separado de la vertical vuelve á ella por efecto de la gravedad. Iguales movimientos se observan exactamente en las agujas magnetizadas y suspendidas libremente si se les separa, por poco que sea.

del meridiano magnético. Asi, tanto en esto como en la direccion constante que las hace tomar, el globo terrestre obra sobre ellas como un verdadero iman; ya sea que deba esta propiedad á la multitud de minas de hierro que contiene, ya la reciba de alguna otra causa mas general. Esto nos ofrece una escelente denominacion para distinguir las dos especies de magnetismo, llamando *boreal* al que domina en la parte boreal del globo, y *austral* á la que domina en el hemisferio de este nombre; en cuyo caso, para conservar la analogía de las atracciones y repulsiones habremos de considerar el estremo de las barras que se dirijen al norte como su polo austral, y el que se dirije al sur como su polo boreal.

Las esperiencias anteriores no nos indican mas que la direccion del plano vertical, en que se halla en cada punto la resultante de todas las fuerzas magnéticas del globo terrestre; pero ¿cuál es la direccion absoluta de esta resultante en aquel plano? Para saberlo construyamos una aguja de acero bien cilíndrica *ab*, fig. 4, colocando en medio de su longitud un eje que la sea perpendicular; suspendámosla de este modo por su centro sobre planos bien pulimentados, y equilibrémosla antes de magnetizarla, de suerte que quede perfectamente horizontal. Si se la comunica en seguida el magnetismo, y se sitúa sobre los mismos apoyos, dirijiéndola conforme al meridiano magnético, no se mantendrá horizontalmente, sino que el estremo que posee el magnetismo austral, se inclinará hácia el horizonte, á lo menos en nuestros climas, y despues de algunas oscilaciones se detendrá, formando con la horizontal un ángulo fijo. Este ángulo se llama *inclinacion magnética*, y varía en los diferentes puntos de la tierra. Hay una zona cerca del ecuador, en que la aguja magnetizada permanece horizontal, y al mediodia de esta zona, la aguja inclina hácia la superficie de la tierra su estremo que posee el magnetismo boreal;

lo cual denota dos especies de fuerzas magnéticas, unas boreales y otras australes, colocadas á una y otra parte del ecuador terrestre. Mas adelante estudiaremos detenidamente las leyes particulares de este fenómeno, limitándonos por ahora á indicarle como un hecho descubierto por la observacion.

Para medir exactamente la inclinacion magnética se coloca el eje de suspension de la aguja en el centro de un círculo vertical de cobre MM, fig. 5, cuyo limbo, dividido en grados, gira al rededor de un eje igualmente vertical VV, de modo que pueda colocarse en todos los acimutes. El eje VV se halla colocado en el centro de otro círculo horizontal, tambien graduado, que sirve para determinar la direccion en que se coloca el primer círculo MM. Este instrumento se llama *brújula de inclinacion*. Es preciso tomar muchas precauciones importantes para magnetizar la aguja, colocarla y aun medir el ángulo de inclinacion; pero no podemos esplicarlas hasta haber establecido las leyes del magnetismo.

Luego que de este modo se conoce en un punto la direccion de la resultante de las fuerzas magnéticas, ejercidas por el globo terrestre, se puede manifestar su accion instantáneamente por medio de una esperiencia singular. Cuélguese una aguja magnetizada ab, fig. 6, por su centro de una reunion de hilos de seda sin torcer, equilibrándola por medio de un contrapesito colocado en su estremo sur, de suerte que pueda moverse libremente en un plano horizontal. Despues, cuando naturalmente se haya colocado en el meridiano magnético, y se encuentre en reposo, tómese una barra de hierro dulce no magnetizada $A'B'$, como de metro y medio de longitud y uno ó dos centímetros de cuadrado; y colocándola poco mas ó menos en la direccion de la inclinacion magnética, aproxímese su estremo inferior A' al estremo de la aguja que se dirije hácia el norte; inmediatamente se notará una repulsion. Acérquese por el contrario el estremo B', bajando la

barra paralelamente á sí misma, fig. 7, y se notará una atraccion. Se ve, pues, que en este estado de inclinacion, la barra se halla magnetizada de repente por la influencia del globo terrestre, como lo hubiera sido por la de cualquiera otro iman á que se hubiera presentado, tomando su mitad inferior y mas inmediata á la tierra un magnetismo contrario al que domina en nuestro hemisferio, es decir, el magnetismo austral, y la mitad superior la otra especie, es decir el magnetismo boreal. Los dos estremos A′ B′ de la barra se hallan, pues, en el mismo estado que los dos estremos *a b* de la aguja, dirijidos hácia los mismos polos terrestres, y esta es la razon por que ha habido repulsion al acercar A′ á *a*, y atraccion al aproximar B. Para demostrar que estos fenómenos dependen en efecto de una magnetizacion repentina, comunicada á la barra en virtud de la posicion en que se coloca, no hay mas que trastornar los estremos dejando la barra en la misma direccion; cada estremo superior é inferior producirá los mismos efectos que acabamos de describir, y por consiguiente opuestos á los que producia antes el mismo estremo. Luego los polos magnéticos de la barra se han invertido por esta variacion; y para que esto pueda verificarse es por lo que se usa de una barra de hierro dulce, y no de acero ó hierro batido.

La propiedad directriz del iman es uno de los descubrimientos mas importantes que han hecho los hombres, pues ha dado á los navegantes un medio seguro de conocer la direccion de su camino en la inmensidad de los mares, en medio de las noches mas oscuras, y cuando las brumas y tempestades les privan absolutamente de la observacion de los astros. Una aguja magnetizada, puesta en equilibrio sobre un estilete, les manifiesta el norte y el sur tan bien como las observaciones astronómicas. Esta invencion tan útil y sencilla no es anterior al siglo XII: hasta entonces los navegantes no podian espouerse

separándose de las costas; mas el descubrimiento de la brújula les ha facilitado el medio de engolfarse en alta mar, y de ir á descubrir nuevas tierras, ignoradas de las naciones mas poderosas de la antigüedad.

Tales son los principales fenómenos de las atracciones y repulsiones magnéticas; mas antes de reducirlas á teoría vamos á presentar algunos hechos particulares, de que no hemos hablado antes por no interrumpir la serie de los razonamientos.

Se ha creido por mucho tiempo que el hierro y el acero eran las únicas sustancias capaces de recibir el magnetismo; mas en los últimos tiempos se ha reconocido que el niquel y el cobalto gozan de la misma propiedad.

Para que estos metales se hagan magnéticos no es indispensable que hayan sufrido la influencia de un iman. Las barras de hierro que han estado mucho tiempo elevadas en la atmósfera llegan á adquirir la virtud magnética, como lo observó primero Gassendi en la cruz del campanario de san Juan d' Aix en Provenza, y como se ha visto despues en la cruz del campanario de la catedral de Chartres. A la verdad, se puede suponer que está desarrollada por la accion prolongada del iman terrestre; pero varios medios mecánicos, como el choque, la presion, la torsion ó una descarga eléctrica, producen instantáneamente el mismo efecto.

Se toma un arambre de hierro comun de dos ó tres líneas de diámetro y doce ó quince pulgadas de longitud; se machaca uno de sus estremos sobre un plano de hierrro, ó se le hace pasar por una abertura hecha en una lámina de hierro un poco grueso, y se dobla y retuerce en diferentes direcciones hasta que se rompe. En virtud de estos movimientos adquiere la virtud magnética, pues atrae las limaduras de hierro, y si se presenta á una aguja magnetizada, suspendida libremente, atrae uno de sus polos y rechaza el otro.

El mismo efecto se produce en una varilla de

hierro duro, colocándola verticalmente, y golpeando ligeramente su estremo superior con un martillo; mas para que el fenómeno se haga sensible es preciso que tenga á lo menos dos ó tres pies de longitud. Si se trastorna su posicion y se empieza á golpear en el otro estremo, se destruye poco á poco el magnetismo que se la habia comunicado, y se llega á darla otro contrario, de suerte que sus polos quedan invertidos. El mismo efecto se produce tambien dejándola caer sobre un cuerpo duro. Por esta razon se hallan casi siempre magnetizadas las herramientas de los cerrageros por los choques reiterados que sufren; y las tigeras, los cuchillos y todos los cuerpos cortantes lo estan tambien mas ó menos, sobre todo si se ha cortado hierro con ellos. Las descargas eléctricas; obrando como un choque, desenrollan tambien el magnetismo en los arambres de hierro que se les hace atravesar; y el rayo produce el mismo resultado en las brújulas de los navíos, cuyos pòlos invierte algunas veces.

Segun esto podria preguntarse si la magnetizacion no consistirá en una especie de dislocacion ocasionada en las partículas del hierro ó del acero. Para conocerlo ha tratado de indagar Mr. Gay-Lussac si estos metales sufrian alguna alteracion en sus dimensiones al adquirir las propiedades magnéticas. Ha tomado un tubo de hierro hueco A B, fig. 8, cerrado por ambos estremos, y á uno de estos ha adaptado un tubo de vidrio muy fino dividido en partes iguales. Ha hecho entrar agua en este aparato hasta llenar parte del tubo de vidrio; y habiendo esperado algun tiempo para que fuese estable la temperatura del agua, ha magnetizado el tubo de hierro. El nivel del agua en el de vidrio no ha sufrido ninguna alteracion, y por consiguiente la mudanza de estado no habia producido en el hierro ninguna variacion apreciable de volúmen.

La contigüidad mas ó menos perfecta de las partículas de un pedazo de hierro ó de niquel, influye

mucho sobre la facilidad de magnetizarle. Estos metales, cuando se hallan puros, y perfectamente dúctiles, no conservan el magnetismo sino que le adquieren y le pierden instantaneamente, mas se les hace capaces de conservarle, ya por medios mecánicos como la presion, la torsion, la reduccion á láminas &c., ó ya como ha observado Mr. Gay-Lussac combinándolos químicamente con sustancias no magnéticas, como el carbon, el fosforo, el arsénico y el estaño. A medida que se aumenta la cantidad de estas sustancias, es mas dificil comunicar el magnetismo, y se conserva mas largo tiempo; pero al fin se llega á un punto en que de ningun modo se le puede desenvolver, y en que la combinacion deja de ser atraida por el iman. Segun esto, es natural pensar que los fenómenos magnéticos deben modificarse por el calor que influye sobre la cohesion de un modo tan poderoso é inmediato; y en efecto se ha observado hace mucho tiempo que las barras magnetizadas pierden absolutamente su magnetismo calentándolas hasta enrojecerlas. Mr. Gay-Lussac ha observado el mismo efecto en el niquel, y además ha notado que estos metales dejan de ser entonces atraidos por el iman.

Tambien debemos hacer observar aqui la influencia del temple sobre el magnetismo, y para esto es preciso recordar en qué consiste esta operacion. Cuando una barra de hierro ó acero se ha calentado hasta enrojecerla, y se la deja enfriar poco á poco en el aire, sus partículas aproximándose lentamente unas á otras toman las distancias y posiciones de equilibrio estable, á que las conduce por grados el efecto lento y progresivo de sus atracciones recíprocas. Pero si de pronto se sumerge la barra enrojecida en un líquido que enfrie repentinamente su superficie, las partículas de esta toman desde luego las colocaciones á que las precisa este cambio imprevisto, y quedando inmóviles forman una especie de vaso, á que tienen que arreglarse con rapidez las mo-

léculas interiores de la masa, al paso que llega á ellas el enfriamiento. De aqui resulta una especie de cristalizacion, diferente del equilibrio estable, como se observa en las lágrimas batávicas que no son otra cosa que vidrio templado. Cuando se hace sufrir esta operacion al hierro, al acero, al niquel y al cobalto, se ve como hemos observado en otra parte, que estos metales se vuelven mas duros, menos flexibles y mas frágiles; y todo esto en un grado tanto mas notable cuanto mas repentino ha sido el enfriamiento; debe, pues, esperarse que un cambio semejante influirá sobre las propiedades magnéticas, y en efecto asi sucede. Los metales magnéticos se magnetizan con mayor dificultad cuando estan templados que cuando no lo están, y el desarrollo del magnetismo es en ellos mucho mas durable. La dificultad de la magnetizacion aumenta á proporcion de la dureza del temple la cual influye tambien sobre la intensidad del estado magnético que pueden adquirir las barras.

Como el efecto del temple depende de la diferencia de temperaturas en que se coloca repentinamente el metal, es necesario buscar medios para valuar estas; es muy fácil respecto al líquido en que se verifica el temple, pero lo es mucho menos respecto al metal, cuyo grado de calor pasa aun mas allá de donde alcanzan nuestros métodos termométricos. En la práctica ordinaria se emplea como una indicacion constante el color que adquiere el metal, y asi se dice que tiene un temple rojo claro, rojo, rojo de cereza, cereza claro, segun la tinta que presenta el metal en el momento de introducirle en el líquido que ha de templarle. Aunque esta indicacion es necesariamente muy imperfecta, sin embargo, basta casi siempre para las esperiencias magnéticas, en que los diferentes grados de temple no tienen una influencia sensible, sino hasta cierto grado de temperatura; pues los grados mas elevados no alteran absolutamente nada la intensidad del magnetismo que pueden adquirir las barras.

CAPITULO II.

Consideraciones generales sobre el desenrollo del magnetismo en las barras magnetizadas; su analogía con las pilas eléctricas.

Los fenómenos que acabamos de describir tienen una analogía tan visible con los de la turmalina y de las pilas eléctricas aisladas, que parece deben esplicarse por una teoría enteramente semejante. En efecto, vamos á convencernos de ello por su comparacion.

Desde luego hemos reconocido dos principios magnéticos distintos, cada uno de los cuales rechaza al del mismo nómbre, y atrae al puesto. Estos dos principios existen primitivamente en cada pedazo de hierro antes de ser magnetizado, pues nada se transmite por la magnetizacion, y nada èntra en el hierro, ni sale de él por el contacto. Se hallan, pues, entonces combinados y disimulados uno por otro como las electricidades naturales de los cuerpos, y por eso es nula su accion á distancia. Mas luego que se hallan separadas por una influencia esterior que obra con distinta energía sobre cada uno de ellos, se manifiesta esta accion del mismo modo que las electricidades naturales de los cuerpos manifiestan sus propiedades atractivas y repulsivas cuando se hallan descompuestas por la influencia de un cuerpo electrizado. Digo mas; que se hallan asi, y se descomponen de este modo en cada partícula de hierro sin que se verifique ninguna comunicacion de magnetismo de una partícula á otra; porque si despues de electrizada una barra se rompe en dos, tres, ó un número cualquiera de partes, cada una de estas manifiesta espontáneamente dos polos, como los fragmentos de turmalina ó las divisiones de las pilas electricas; y los polos de nombres contrarios se colocan en los estremos que anteriormente se hallaban contiguos del

mismo modo que se verifica en las turmalinas y en las pilas. Mas la separacion en muchos fragmentos no puede tener ninguna influencia para producir estos polos; luego no hace mas que manifestarlos sustrayéndolos de la atraccion de las partículas contiguas, por la cual estaban disimulados en la columna magnética entera como los polos eléctricos contiguos lo estan en una turmalina. Si se quiere comprobar esto sintéticamente no hay mas que reunir muchas barritas por sus estremos, y magnetizarlas todas á un tiempo, como si fuese una sola barra, ya poniendo los dos estremos de la cadena en contacto con los polos opuestos de dos imanes, ya haciendo pasar sobre toda su longitud uno de los polos de un solo iman. Cualquiera que sea el método que se emplee, la serie de barritas se magnetizará como se magnetizaria una barra contínua de las mismas dimensiones, con la cual se procediese del mismo modo. Si se han empleado, por ejemplo, pedacitos de arambre de acero recocido, de uno ó dos milímetros de diametro, y cuyo conjunto forme una longitud de dos ó tres decímetros solamente, se hallará, en general, que la mitad de la cadena ejerce el magnetismo boreal y la otra el austral; mas si se deshace la cadena cada pedacito sustraido de la influencia de los demas manifestará al momento dos polos, y presentará, como el todo, el magnetismo boreal en la mitad de su longitud, y el austral en la otra mitad. Disminúyanse las dimensiones de estos pedacitos hasta reducirlos á una simple partícula, y se tendrá una exacta representacion del estado de las partículas ferruginosas en las barras magnetizadas; y de este modo se podrá concebir cómo el sistema de todas estas fuerzas pequeñas pueden, segun las proporciones de las que se siguen, dar resultados opuestos en los dos estremos de la barra, y aun algunas veces muchos resultados alternativamente contrarios en diversos puntos de su longitud.

Ahora bien, cuando los dos magnetismos se han

separado en las partículas de un pedazo de hierro duro ó de acero, la esperiencia hace ver que no vuelven á combinarse sino con una estrema lentitud: es, pues, necesario que haya alguna causa que se oponga á su atraccion mútua; y cualquiera que sea se puede comparar con la resistencia que encuentra la electricidad para moverse sobre la superficie y en lo interior de los cuerpos resinosos. Cuanto mayor sea esta resistencia mas dificil será comunicar al cuerpo el estado magnético, y mas tiempo tardará este en disiparse; tal es el caso del acero muy duro. Si por el contrario esta resistencia fuese nula las dos electricidades se separarian en cada partícula por la accion de la mas débil influencia, y se reunirian al momento que esta dejase de obrar; este es el caso del hierro, del cobalto y del niquel cuando tienen una perfecta ductilidad. Pero aun en esta circunstancia no debe haber ninguna transmision de magnetismo de una partícula á otra, sino que todo el efecto de composiciones y descomposiciones se verifica en lo interior de cada partícula, habiendo de una á otra una absoluta impermeabilidad. Asi es exactamente como en las pilas eléctricas formadas con láminas de vidrio cubiertas de metal, las descomposiciones y recomposiciones de las electricidades naturales se verifican con una grandísima facilidad entre las superficies que se comunican recíprocamente, sin que se transmita nada por medio de las láminas aisladoras que las separan del resto de la cadena.

Las comparaciones que acabamos de hacer me parecen suficientes para dar á conocer de una manera exacta la constitucion íntima de los imanes y de las barras magnetizadas. Nos falta ahora determinar por medio de la esperiencia la naturaleza y cantidad de magnetismo libre que se halla en cada punto de estos cuerpos, y la ley que se sigue de cada especie de magnetismo en sus atracciones y repulsiones. Esta segunda cuestion, que ya hemos intentado al tratar de las esperiencias eléctricas, no puede aqui examinar-

se sinó despues de la otra; porque no pudiendo aislar uno de los magnetismos, nos vemos precisados á estudiar los fenómenos compuestos que resultan de la coexistencia de ambos, en cuerpos cuya distribucion conocemos.

Al estudiar la distribucion de la electricidad en equilibrio en los cuerpos conductores hemos visto que estaba sujeta á una condicion única á saber, que la electricidad libre no ejerciese ninguna accion atractiva ni repulsiva sobre los puntos del interior del cuerpo. En el magnetismo no es necesario para que haya equilibrio que sea nula la accion interior, bastando que sea inferior á la resistencia que la fuerza coercitiva del metal opone á la separacion de los magnetismos naturales ó á su reunion; lo cual puede verificarse de una infinidad de modos, y aun habiendo intervalos en el desenrollo del magnetismo sobre los diferentes puntos de la longitud de una barra; de suerte, que bajo este punto de vista general, la cuestion es absolutamente indeterminada.

Sin embargo, hay un caso que merece considerarse muy particularmente, porque ofrece el límite de todos los casos posibles, y es el mas útil de todos, á saber, aquel en que la cantidad de magnetismo libre es tal, que la suma de todas las fuerzas atractivas y repulsivas que resultan de ella respecto á cada punto de la lámina iguala precisamente á la resistencia que la fuerza coercitiva opone á la reunion de los magnetismos naturales. Cuando una lámina se halla en este caso es evidente que tiene en cada uno de sus puntos la mayor cantidad de magnetismo libre que puede admitir, y entonces se dice que está *magnetizada hasta la saturacion.*

El medio mas sencillo y seguro para conseguirlo es someter la lámina que se quiere magnetizar á influencias tan enérgicas, que momentáneamente se verifique en sus partículas una descomposicion de los magnetismos naturales, mayor que la que puede subsistir, segun la resistencia de la fuerza coer-

citiva; pues entonces, sustrayéndola de esta influencia, el primer límite que se presentará á la recomposicion de los magnetismos separados será el que constituye la magnetizacion máxima.

Pronto trataremos de comprobar esta idea por la esperiencia; mas antes es necesario que demostremos las leyes con que el iman terrestre obra sobre las barras magnetizadas suspendidas libremente; porque pudiendo ejercerse esta accion á un mismo tiempo sobre todas las que se presenten sin ninguna disminucion sensible por su parte, nos ofrecerá un medio escelente para apreciar la intesidad del magnetismo que desenvolvamos en ellas.

CAPITULO III.

Determinacion y medida de las fuerzas directrices ejercidas por el globo terrestre sobre las agujas magnetizadas.

Cuando una aguja magnetizada y suspendida libremente por su centro se transporta sucesivamente á diferentes parages poco distantes unos de otros relativamente á las dimensiones del globo terrestre, las direcciones que toma en virtud de la accion magnética de este globo son sensiblemente paralelas, y solo separándose á grandes distancias, por ejemplo, á muchas leguas, empieza á notarse en ellas alguna pequeña divergencia. Lo mismo sucede elevándose sobre la superficie de la tierra, ó bajando á cavidades profundas, con tal que en este caso se separen todos los cuerpos ferruginosos que pudieran obrar inmediatamente sobre la aguja y separarla de su direccion natural. Este fenómeno se verifica igualmente con las agujas mas grandes y con las mas pequeñas, y prueba que la fuerza magnética del globo terrestre puede considerarse como la pesantez que obra en direcciones paralelas cuando se la compara á sí misma en puntos poco distantes. Asi todas las consideracio-

nes de mecánica, que sirven para calcular el equilibrio de los cuerpos graves, pueden aplicarse igualmente á los cuerpos magnéticos; solo sí es preciso no perder de vista que al mismo tiempo son pesados y magnéticos. Examinemos las consecuencias que resultan de este principio.

Sea $a\ b$, fig. 9, una aguja magnetizada, de cualquiera figura, suspendida libremente por su centro de gravedad C. El esfuerzo de la gravedad quedará destruido por la resistencia del punto de suspension; y por consiguiente se podrá considerar la aguja como no pesada, y únicamente escitada por las fuerzas magnéticas del globo terrestre.

Para analizar claramente los efectos que sufre por esta parte sigamos la misma marcha que en los fenómenos de la gravedad; descompongamos mentalmente la masa de la aguja en elementos tan pequeños, que pueda considerarse como uniforme el estado magnético en cada uno de ellos, aunque varíe de un elemento á otro; despues, eligiendo uno de estos elementos, por ejemplo, M, en que para fijar las ideas supondremos que hay una cierta cantidad de magnetismo austral libre, determinemos las acciones que le escitan. Es evidente que será atraido por las fuerzas boreales de la tierra y rechazado por las australes. Supongamos que la resultante de las primeras siga la direccion M B y la de las últimas la direccion M A, representando los tamaños de estas líneas los esfuerzos de una y otra cuando obran sobre cierta cantidad de magnetismo austral ó boreal que tomaremos por unidad de masa magnética. Entonces, acabando el paralelogramo M A R B M, compondremos las dos resultantes parciales en una sola M R, equivalente á su conjunto: y el punto M podrá considerarse como solicitado por esta resultante única con una energía proporcional á la masa magnética que posee; del mismo modo que los diferentes elementos de un cuerpo grave son impelidos por la pesantez proporcionalmente á su densidad. En nuestros climas,

en que la fuerza boreal es predominante, la resultante MR atraerá hácia la tierra los elementos cargados de magnetismo austral libre, y rechazará los que se hallen cargados de magnetismo boreal; luego si en el primer caso la designamos por MR, será necesario representarla en el segundo por una línea M′ R′ igual y paralela á MR, pero en direccion opuesta.

Ahora bien, estando todos los puntos de la aguja solicitados por una ú otra de estas fuerzas con una intensidad proporcional á su masa magnética, resulta que se puede aplicar aqui todo lo que hemos dicho en el libro primero sobre el equilibrio de los sistemas de forma invariable, solicitados por fuerzas paralelas. Este caso es absolutamente el mismo que seria el de los cuerpos pesados de una densidad variable, si hubiese dos gravedades, una atractiva respecto á ciertos puntos del cuerpo, y otra repulsiva respecto á los demas. De aqui se derivan inmediatamente varias consecuencias importantes, que basta enunciar para convencerse de su verdad por analogía.

1.° Todas las fuerzas atractivas, multiplicadas respectivamente por la masa magnética austral del elemento á que se hallan aplicadas, se podrán componer en una resultante única GN, igual á su suma, paralela á su direccion, y que pase por un punto G de la aguja que sea con respecto á estas fuerzas lo que el centro de gravedad es con respecto á esta.

2.° Las fuerzas repulsivas multiplicadas del mismo modo por las masas magnéticas boreales de los elementos sobre que obran, podrán componerse igualmente en una resultante unica G′ S, igual á su suma, paralela á su direccion, y por consiguiente á la de las fuerzas atractivas. Esta resultante tendrá del mismo modo su centro particular de aplicacion G′, cuya posicion, dependiendo del modo de distribucion de las fuerzas componentes, deberá ser, en general, distinto de G.

3.º Siendo producido el estado magnético de la aguja, únicamente por la descomposicion de sus magnetismos naturales, sin ninguna pérdida ni introduccion estraña, y siendo tales las cantidades de estos magnetismos que sus esfuerzos se neutralizaban mútuamente en cada punto antes de su separacion, se sigue que la misma igualdad deberá verificarse totalmente en el estado magnético, que no es otra cosa mas que una distribucion diferente de los mismos esfuerzos. Así, la resultante total atractiva GN deberá ser igual á la resultante total repulsiva G'S, y su suma será nula; de suerte que no podrán dar á la aguja ningun movimiento de translacion en el espacio: Pero figurándose un plano NGG'S que las contenga, tendrán tendencia á hacer girar la aguja al rededor del punto C', situado en medio de la recta GG' que une sus puntos de aplicacion; y este efecto se producirá realmente, á menos que no se haya colocado desde luego la recta GG' en su misma direccion, fig. 10, pues entonces no tendrán ninguna tendencia á sacarla de ella. Tal es, pues, la posicion que debe darse á la aguja al rededor de su suspension C para que permanezca en equilibrio. En este caso, el plano vertical dirigido paralelamente á la resultante SN de las fuerzas magnéticas, se llama *meridiano magnético*, y la recta G G' *eje magnético de la aguja*; el cual cuando la aguja puede compararse á un simple hilo rectilíneo, fig. 11, coincide siempre con la direccion de su longitud.

4.º Puesto que las fuerzas GN, GS no pueden producir ningun movimiento de translacion, no hay necesidad de asegurar la aguja contra ellas, y solo sí contra el esfuerzo vertical de la gravedad. Bastará, pues, para esta parte de su equilibrio que su centro de gravedad esté sostenido verticalmente, por ejemplo, por medio de un hilo vertical inestensible, cuyo estremo superior se halle unido á un punto fijo. La direccion vertical de este hilo no se alterará absolutamente nada por las fuerzas magnéticas; re-

sultado que está conforme con la esperiencia, pero que es muy dificil comprobar directamente. En lugar de intentarlo concibamos que la resultante total de las fuerzas magnéticas G″ R″, fig. 12, en el caso de no ser nula se descomponga en dos fuerzas, una vertical G″ V″, y otra horizontal G″ H″ dirigida por el meridiano magnético. Si la primera de estas componentes no es nula deberá añadirse á la gravedad ó disminuirla, y por lo mismo aumentar ó disminuir el peso de las agujas; lo cual no sucede, pues este peso, medido con las mejores balanzas es exactamente el mismo, antes y despues de la magnetizacion. Ahora bien, para esperimentar la componente horizontal, cuélguese de un hilo de seda sin torcer CZ, fig. 13, una tira de carton AB, en uno de cuyos estremos y perpendicularmente á su direccion, se coloque la aguja magnetizada *ab*, equilibrando el lado opuesto con un pesito M, de modo que la tira quede horizontal. Despues colóquese el sistema de manera que *ab* se halle exactamente en la direccion del meridiano magnético, determinado por la direccion de otra aguja, sostenida horizontalmente por su centro de gravedad; y se verá que AB permanece en equilibrio en esta posicion. Esto no podria verificarse si la fuerza magnética horizontal dirigida en el sentido *ab* no fuese absolutamente nula, pues no siéndolo conspiraria á hacer girar la palanca CA al rededor de su punto de suspension C. Esta fuerza es, pues, nula, asi como la componente vertical; luego la resultante total es nula tambien, como nos habian indicado las consideraciones mecánicas fundadas en el desarrollo que constituye la magnetizacion, y que de esta suerte queda rigorosamente demostrado.

Conocido el modo de componerse las fuerzas magnéticas en su accion sobre una aguja colgada de su centro de gravedad, nada hay mas fácil que hallar medios esperimentales para determinar en cada sitio todos los elementos del magnetismo ter-

restre con la mayor exactitud.

Para ello consideremos la resultante atractiva G N, fig. 14, y la resultante repulsiva G′ S, descompuestas como antes cada una en otras dos, unas verticales G V, G′ V′, y otras horizontales G H, G′ H′ dirigidas en el meridiano magnético; y para abreviar llamemos V V′ las fuerzas verticales, y H H′ las horizontales.

Tomemos ahora una aguja magnetizada *ab*, fig. 15, en la cual supondremos que se conoce ya el eje magnético G G′, pues muy pronto veremos cómo se puede determinar. Colguemos esta aguja por su centro de gravedad C de un conjunto de hilos de seda sin torcer, y equilibrémosla con un contrapesito colocado en su brazo sur, de modo que el eje G G′ resulte horizontal. Entonces quedará destruido el efecto de las fuerzas verticales V V′, y no quedará mas que el de las horizontales H H′, cuyo esfuerzo conspirará á colocar el eje G G′ en la direccion del meridiano magnético, al cual son paralelas; de modo que no le comunicarán ningun movimiento si se halla ya en él; pero por poco que se separe le conducirán á esta direccion por medio de una serie de oscilaciones, del mismo modo que un péndulo separado de la vertical es conducido á ella por la gravedad. Todo se reduce, pues, á buscar esta direccion, en que la aguja colocada horizontalmente pueda permanecer en reposo; lo cual puede conseguirse haciéndola girar sucesivamente hácia diferentes puntos del espacio, ó bien por medio de los límites de su movimiento oscilatorio; puesto que el meridiano magnético pasa por medio de los arcos que describe. Asi, cuando se haya reconocido poco mas ó menos, se aproxima á ella la aguja, y debilitándose poco á poco sus movimientos por la resistencia del aire acabará fijándose en la direccion verdadera. Luego que se halle tranquila se medirá el ángulo que forma su direccion con el meridiano celeste; y se conocerá el meridiano magnético y la

declinacion de la aguja en el sitio en que se haya observado.

La energía con que la aguja es conducida al meridiano magnético depende de la intensidad absoluta de las fuerzas atractivas y repulsivas GH, G′H′ que obran sobre ella; mas tambien depende de la posicion de sus puntos de aplicacion G G′, pues el eje magnético puede compararse á una palanca que se hallase impelida por estas dos fuerzas. Por ejemplo, si los puntos de aplicacion G, G′ se encontrasen ambos al mismo lado del eje vertical de suspension, es claro que se contrariarian las acciones rotatorias de ambas fuerzas, y la accion efectiva seria igual á la diferencia de sus momentos estáticos, calculados con relacion á este eje. Si los puntos de aplicacion G, G′ se hallan situados á un lado y otro del eje de suspension, las fuerzas rotatorias conspirarán en un mismo sentido, y producirán un esfuerzo igual á la suma de los momentos estáticos de las dos fuerzas; esta disposicion será, pues, mucho mas ventajosa para vencer los rozamientos y la inercia de las suspensiones cuando la aguja se halle colocada sobre estiletes, y por lo mismo deberán buscarse medios de obtener esta distribucion del magnetismo. Mas adelante lo haremos asi, y veremos que por un método de magnetizar, llamado del doble toque, se pueden llegar á obtener los puntos G, G′ á igual distancia por una y otra parte del centro de gravedad de la aguja, de modo que el eje GG′ pase por el centro de figura C. Entonces las fuerzas rotatorias son iguales entre sí, y sus efectos son los mismos que si la aguja se hallase solicitada por una sola fuerza doble de las verdaderas, y aplicada á uno de los puntos G G′ por un solo lado del eje de suspension.

En general la fuerza horizontal directriz se mide fácilmente por medio de la balanza de torsion, fig. 16. Para esto se suspende en la parte inferior de un hilo metálico CZ, fig. 17, un estrivito formado de una

hoja de cobre muy ligera, en cuyo interior se estiende una capa de lacre, donde se marca la señal de la aguja para poderla colocar siempre del mismo modo. A fin de detener prontamente sus oscilaciones se coloca debajo del estrivo un volante muy delgado V V, que se introduce enteramente en un vaso lleno de agua ó aceite. Para medir la fuerza directriz se dan al hilo diferentes grados de torsion conocidos, y se observa cuánto separa cada torsion la aguja del meridiano magnético cuando queda en reposo; mas hemos dicho que la direccion del meridiano magnético no es siempre constante en un mismó sitio. Para observar sus variaciones se puede colocar, como ha hecho Mr. de Prony, un anteojo sobre una aguja horizontal colgada de hilos de seda sin torcer. Coulomb empleaba un aparato aun mas simple, representado en la fig. 18. Se compone de una caja de madera cubierta con un cristal por la parte superior, en cuyos dos estremos hay dos microscopios verticales, con hilos en cruz en su interior, y movibles á lo largo de una division de cobre puesta sobre la caja. La aguja, colgada de hilos de seda sin torcer y puesta horizontal por medio de un contrapeso, tiene la longitud suficiente para que sus estremos lleguen bajo los microscopios y se les pueda ver oscilar por ellos: sobre cada estremo está marcada una señal muy fina. Se coloca la caja desde luego de modo que sus lados mayores se hallen poco mas ó menos en la direccion del meridiano magnético; á fin de que la aguja se dirija hácia el medio de las divisiones. Cuando se ha fijado se mueven con cuidado los microscopios por medio de sus tornillos, hasta que la cruz de sus hilos coincida exactamente con la señal hecha en el estremo de la aguja, y se anota la hora de la observacion. Se visitan de nuevo los microscopios á otra hora diferente, y se ve si la aguja ha mudado de posicion; se colocan de nuevo los hilos sobre la señal, y la marcha de los microscopios, medida por la division en que es-

tan colocados hacen conocer la variacion que ha sufrido la aguja.

En fin, se puede determinar tambien la direccion del meridiano magnético por medio de la brújula de inclinacion, que hemos descrito en el capítulo 1.°, y está representada en la fig. 5. En este instrumento la aguja solo puede girar verticalmente al rededor de su eje horizontal sin salir del plano vertical en que se halla el círculo donde oscila. Concibamos, pues, que este círculo esté colocado en una direccion perpendicular al meridiano magnético, fig. 19. Entonces las fuerzas horizontales H H′ paralelas á este plano quedarán completamente destruidas por los puntos de suspension, y obrarán solo las fuerzas verticales V V′, procurando colocar el eje magnético en su direccion, esto es, ponerle vertical, de suerte que si se le coloca en esta posicion permanecerá en reposo. He aqui, pues, un carácter para reconocer la direccion perpendicular al meridiano magnético se volverá el círculo vertical en que está colocada la aguja hasta que se satisfaga á esta condicion, y leyendo sobre la division horizontal el punto en que se detiene se le conducirá á 90.° de este punto, y se hallará en el meridiano magnético.

Si en esta nueva posicion se observa en el círculo vertical el punto de la division en que se detiene el eje magnético, el arco comprendido entre este punto y el vertical inferior del mismo círculo dará la *inclinacion magnética* contada desde la vertical. Para que sean exactas esta observacion y la anterior es necesario comprobar con muchísimo cuidado la horizontalidad del círculo azimutal sobre que reposa el instrumento, para cuyo efecto tiene dos niveles dirijidos en sentidos rectangulares; y si la horizontalidad no es perfecta es preciso restablecerla alzando ó bajando los tornillos que sirven de pies al instrumento.

Si estando dirijida la aguja de inclinacion por

el meridiano magnético, y hallándose en equilibrio su eje magnético en la direccion de las fuerzas que obran sobre ella, se la separa de su direccion de equilibrio sin sacarla del plano vertical, es claro que las fuerzas magnéticas la harán volver á su antigua posicion por una serie de oscilaciones, cuyas leyes serán absolutamente las mismas que las de un péndulo que oscila por efecto de la gravedad. Suponiendo, pues, que se conozca la distribucion del magnetismo en cada punto de la aguja, se podrá determinar su centro de oscilacion, como se determinaria el de un cuerpo pesado heterogéneo; y observando despues el número de oscilaciones que ejecuta en un tiempo dado, se podrán comparar por medio del cálculo á las que daria un péndulo simple de la misma forma y masa, en que el magnetismo austral ó boreal estuviese reemplazado por la gravedad terrestre tomada á un lado positivamente y al otro negativamente; lo cual dará la relacion de intensidad de la fuerza magnética y de la gravedad. Esta relacion dependerá de la cantidad absoluta de magnetismo desenrollado en la aguja y de su distribucion; cambiará, pues, con estos dos elementos, pero permanecerá constante respecto á la misma aguja, siempre que esta conserve el mismo estado magnético, ó si habiéndole perdido se vuelve á magnetizar del mismo modo y en igual grado. Asi, transportando una aguja semejante á diferentes puntos de la tierra, y contando el número de oscilaciones que ejecuta en el meridiano magnético en un mismo número de segundos, se podrán comparar las intensidades de la fuerza magnética del globo en estos diversos puntos, como se comparan las intensidades de la gravedad haciendo oscilar un mismo péndulo; y tanto respecto á la gravedad como al magnetismo, las intensidades serán proporcionales á los cuadrados del número de oscilaciones.

Por ejemplo, habiendo llevado Mr. Humboldt al Perú desde Paris una aguja, y habiéndola vuelto a

traer á este último punto, halló que antes y despues de su viaje daba en París 245 oscilaciones en 10 minutos, mientras en el Perú solo producia 211. Luego la intensidad de las fuerzas magnéticas en París es á la misma intensidad en el Perú, como el cuadrado de 245 es al de 211, esto es, como 60025 es á 44521, ó como 135 es á 100. Mas adelante estudiaremos estas variaciones, limitándonos aqui á este solo ejemplo.

La especie de observacion que acabamos de esplicar lleva siempre consigo alguna inexactitud, á causa de los rozamientos inevitables de la suspension; y por lo mismo se puede sustituir con ventaja á este método la observacion de las oscilaciones horizontales combinada con la de la inclinacion magnética. En efecto, supongamos que se han contado las oscilaciones de una aguja horizontal, colgada de hilos de seda, de modo que puedan suponerse sin ninguna torsion: será fácil deducir de este dato el número de oscilaciones que hubiera dado la misma aguja al rededor de la direccion de la inclinacion magnética si hubiese estado sostenida libremente; porque las fuerzas horizontales H H′ no son otra cosa mas que las fuerzas totales GN, G′S, descompuestas horizontalmente en el plano del meridiano magnético, y asi se pueden deducir las últimas por la regla del paralelogramo de las fuerzas cuando se conoce la inclinacion de unas respecto á otras. El número de oscilaciones producidas en igual tiempo por estas dos especies de fuerzas será proporcional á la raiz cuadrada de sus intensidades. Por consiguiente, si se observan las oscilaciones horizontales de una misma aguja en diferentes puntos de la tierra, y al mismo tiempo se determina por una observacion directa la inclinacion en cada uno de estos puntos, se podrán calcular las intensidades correspondientes de las fuerzas magnéticas, con mas seguridad que por medio de las brújulas de inclinacion. Mas no se deberá establecer la horizontalidad de la aguja por

medio de un contrapeso, que variando segun las diferentes latitudes, alteraria el momento estático de la masa movible, sino que bastará unir al hilo de suspension una chapita de papel horizontal donde se coloque la aguja, pues su rigidez la impedirá que pueda inclinarse.

Todas nuestras observaciones de direccion se refieren hasta aqui al eje megnético de las agujas; luego es preciso que sepamos determinar este eje ó suplir su determinacion. Esto se consigue del modo siguiente:

Consideremos una aguja magnetizada, fig. 20, equilibrada de modo que permanezca horizontal y colgada de un hilo, cuya prolongacion pase por su centro de gravedad C; cuando esta aguja se halle en equilibrio, su eje magnético GG′ estará colocado en el meridiano magnético de aquel sitio. Pero esto no basta para reconocerle, pues su marca sobre la aguja es ideal; mas segun las propiedades que hemos reconocido en el centro de las fuerzas paralelas, sabemos que cualquiera posicion que se dé á la aguja, este eje debe permanecer fijo en ella, y conservar invariablemente la misma posicion con respecto á las superficies que limitan su masa. Observemos, pues, sobre algun objeto terrestre la direccion de uno de los lados AB de la aguja cuando está en equilibrio: despues volvámosla lo de arriba abajo, y colguémosla de nuevo del mismo punto C, pasando el hilo de suspension por un agujerito hecho con este objeto. El eje magnético GG′ volverá á colocarse en el meridiano magnético; pero habiendo girado circularmente los lados de la aguja al rededor de este eje no se hallarán en las mismas direcciones que antes; y lo que es mas importante, se separarán del meridiano tanto como anteriormente, pero en sentido opuesto, como manifiesta la figura en que las líneas de puntos A′ B′ C′ D′ representan las posiciones de las superficies despues de la vuelta. Luego si se ha observado, como hemos di-

cho, la direccion de uno de los lados de la aguja en la posicion primitiva, y se hace ahora otro tanto, la verdadera direccion del meridiano magnético será exactamente intermedia entre estas dos, y de este modo se podrá señalar sobre la aguja, ú observar á qué puntos del espacio corresponde su prolongacion.

Tambien es preciso hacer igual operacion con las agujas de inclinacion para determinar el verdadero valor de la inclinacion magnética. Supongamos, fig. 21, que una aguja semejante se halla suspendida por su centro de gravedad, y que se ha observado el punto del círculo vertical en que se detiene cuando una de sus caras, que llamaremos E, se halla vuelta hácia el este del meridiano. Entonces el eje G G′ del meridiano se hallará en la direccion de las dos resultantes G N, G′S, y el ángulo formado por este eje con la vertical será la inclinacion que se busca. Mas no pudiéndose observar la línea ideal G G′, vuélvase el instrumento de modo que la cara E de la aguja mire al oeste, la línea G G′ se colocará invariablemente en la misma posicion; luego si no está dirijida simétricamente con respecto á los lados rectilíneos de la aguja, estos corresponderán á diferentes puntos de la division circular, y tomando una media entre las indicaciones de ambos casos, se obtendrá la verdadera inclinacion. En este raciocinio hemos supuesto que el eje de suspension pasaba por el centro de gravedad de la aguja; si no se verificase esta condicion, la inclinacion determinada por el método que acabamos de describir seria inexacta, aunque muy pronto daremos medios para correjirla.

Los artistas acostumbran muchas veces construir las agujas de las brújulas en forma de flecha, tanto para la inclinacion como para la declinacion; lo cual es efectivamente lo mas cómodo para determinar los puntos de las divisiones á que corresponden sus estremos, y aun tiene esta forma la ventaja

de dar á igual peso una fuerza directriz mucho mas considerable, como veremos despues. Pero esto no evita el que sea necesario tomar para la construccion de estas agujas todas las precauciones que acabamos de indicar, pues no es siempre seguro que el punto de aplicacion de la resultante magnética se halle en el eje de la aguja, esto es, en la línea recta que une sus dos estremos, y solamente las observaciones que acabamos de describir pueden determinar su verdadera direccion.

En fin, hay que tomar todavía otra precaucion en las observaciones de inclinacion para asegurarse enteramente de su exactitud. Hasta aqui hemos supuesto que la aguja se hallaba exactamente suspendida por su centro de gravedad C; lo cual nos evitaba el contar con la accion de la gravedad terrestre, que entonces no ejerce ninguna influencia. Pero en la práctica esperimental es muy dificil, y aun casi imposible, que esta condicion se verifique rigorosamente, y no verificándose resulta un inconveniente muy considerable, pues teniendo una de las mitades de la aguja mayor tendencia que la otra á caer hácia la tierra baja mas de lo que bajaria por sola la accion del magnetismo terrestre, y esto aumenta ó disminuye la verdadera inclinacion, segun la especie de magnetismo que posee esta mitad; de donde resulta un error en las observaciones de intensidad, porque las oscilaciones no se verifican al rededor de la direccion GN, G′ S, de la resultante de las solas fuerzas magnéticas. Esta misma alternativa nos ofrece un medio de correjir el defecto de centralidad de que proviene, á lo menos cuando se sabe que es muy pequeño; bastando para ello magnetizar la aguja en dos sentidos opuestos, de modo que se inviertan sus polos, y observar la inclinacion é intensidad que indica despues de cada operacion. Si hay algun defecto pequeño de centralidad, uno de los resultados será demasiado fuerte y el otro demasiado débil, y su término medio dará

con corta diferencia los verdaderos valores de la inclinacion y de la intensidad, á lo menos si son bien simétricas las dos partes de la aguja, y el magnetismo se distribuye igualmente en ella en ambas operaciones.

Las consideraciones que hemos esplicado en este capítulo son comunes á todas las agujas, é independientes del modo con que el magnetismo libre se halla distribuido en ellas; y solo suponen que el estado magnético de la aguja permanezca el mismo en las diversas posiciones en que se la coloca. Ahora bien, si comparamos las acciones que sufre una misma aguja de parte del iman terrestre, segun el modo de magnetizarla, podremos apreciar el desenrollo producido en los magnetismos naturales, y reconocer los métodos mas ventajosos para obtenerle. Este será el objeto del capítulo siguiente.

CAPITULO IV.

Diferentes métodos de magnetizar.

El mas sencillo de todos los métodos de comunicar el magnetismo es el que hemos esplicado en el capítulo primero, y consiste en acercar el estremo *b* de una barra de acero ó hierro duro á cierta distancia, ó aun hasta el contacto del polo A austral ó boreal de un iman AB, fig. 22. Entonces los magnetismos libres que se hallan en A y en B obran sobre los magnetismos naturales de la barra *a b*; pero la accion de A es mas fuerte por hallarse mas inmediato, y se verifica la descomposicion en cada partícula metálica de *a b*. El magnetismo de nombre contrario A es atraido, el del mismo nombre rechazado; y por un efecto de esta separacion, el estremo *b* de la barra adquiere un polo de naturaleza opuesta á A.

Para convencerse de ello, fórmese con un hilo de acero una agujita *α*B que solo tenga cinco ó seis

milímetros de longitud; magnetícese, frotándola muchas veces contra el polo A, siempre en un mismo sentido; cuélguese por su centro de un hilo finísimo de seda, y acérquese al polo A. Uno de sus estremos, por ejemplo B, será atraido y se dirijirá hácia este polo; mas si se presenta la misma aguja al estremo *b* de la barra que ha estado en contacto con A, se verá al momento que la aguja empieza á dar vueltas sobre sí misma; su estremo B, atraido por A, es rechazado por *b*, y por el contrario, *α* será atraido por *b* y rechazado por A.

Continúese, presentando esta aguja á diferentes puntos de la barra *ba* partiendo del estremo *b*, y se hallará que hasta cierta distancia *bc* el magnetismo es de la misma naturaleza que en *b*; pero en seguida se verá suceder un magnetismo opuesto, porque la aguja girará sobre sí misma presentando á la barra el estremo contrario. Si la barra es corta y el iman fuerte se sostendrá sin interrupcion este nuevo estado hasta el estremo *a*; y por consiguiente tendrá la barra en su segunda parte *ac* un magnetismo de la misma naturaleza que A, y en la primera parte *bc* un magnetismo contrario.

Cuando la barra es bastante larga sucede con frecuencia que el segundo estado no llega hasta el estremo, sino solo hasta cierta distancia a′, fig. 23; entonces sigue otro magnetismo, que es tambien contrario á A, y á este sucede á veces un cuarto magnetismo igual al segundo, y asi sucesivamente. En tal caso la barra tiene varios polos diferentes en su longitud; y la aguja de prueba indica estas alternativas por las inversiones que sufre cada vez que varía la naturaleza del magnetismo; y los puntos de la barra en que esto se verifica se llaman *puntos consiguientes*.

Si se suspende una barra semejante para determinar su fuerza directriz, es claro que las partes situadas á un mismo lado del centro de suspension, que tengan magnetismos de naturaleza opuesta, se

contrariarán en sus esfuerzos, queriendo unas dirijir este estremo de la barra hácia el polo austral y otras hácia el boreal. La fuerza directriz de la barra será, pues, mas débil que seria si cada una de estas mitades tuviese en toda su longitud una sola especie de magnetismo. Por esta razon es sumamente importante evitar los puntos consiguientes en las agujas de brújula; y aun en general deben evitarse, porque una barra no produce asi el mismo efecto que produciria sin estos puntos. En efecto, cualquiera que sea la esperiencia á que se destine, los polos de nombre contrario obrarán siempre á un mismo tiempo, y sus acciones se contrariarán tanto mas, cuanto mas inmediatos se hallen unos á otros, porque será menor la diferencia de sus distancias á los puntos atraidos ó rechazados La magnetizacion mas favorable será, pues, aquella en que cada especie de magnetismo domine sola en una de las mitades de la barra; y asi esta separacion, llevada al mayor grado posible de energía, debe ser el objeto de todos nuestros esfuerzos.

Cuando se magnetiza una barra *ab*, como acabamos de suponer, poniendo uno de sus estremos *b* en contacto con uno de los polos A de un iman, cuanto mas duro es el metal de la barra, ya por su naturaleza, ya por su temple, con tanta mas facilidad adquiere puntos consiguientes. La razon de esto es muy clara, disminuyendo la accion del iman AB á proporcion de la distancia, hay siempre un punto de la barra en que esta accion solo es igual á la fuerza coercitiva. Asi todos los puntos situados mas allá de este límite no sufririan ninguna descomposicion de sus magnetismos naturales si solo se hallasen sujetos á la accion del iman AB; pero la primera parte de la barra *ab*, en que se ha producido ya un desenrollo de magnetismo, obra tambien sobre estos puntos, conspirando á desenrollar en ellos un magnetismo contrario. Como la resultante de esta accion parte de un punto mas inmediato

que la del iman AB, debe haber un término en que sea superior, y entonces se verifica la primera alternativa; lo cual debe suceder tanto mas cerca del punto *b* cuanto mayor es la fuerza coercitiva, pues si fuese infinita, el iman AB solo podria descomponer el magnetismo natural del punto *b* que se halla en contacto con su polo A. El mismo razonamiento puede aplicarse á la comparacion de las acciones ejercidas sobre el resto de la barra por la primera alternativa *b a′* y por la segunda. La preponderancia de esta sobre los puntos que la siguen, en razon de su proximidad, se hará tanto mas sensible, cuanto mayor sea la fuerza coercitiva, y hará nacer mas fácilmente una tercera alternativa. Segun este modo de considerar el fenómeno, la energía de los polos sucesivos debe irse debilitando gradualmente, á medida que se separan del primer estremo *b*, en que es mas enérgico el desenrollo del magnetismo; como en efecto puede comprobarse por la esperiencia, comparando los pesos que pueden adherirse á estas diversas partes de la barra, ó por otros métodos mas exactos que indicaremos despues. Mas si pudiera quedar alguna dificultad sobre esta teoría desapareceria del todo por la esperiencia siguiente, en que se ven producidos por la electricidad los mismos efectos que acabamos de describir.

Tómese un tubo de vidrio pulimentado, de algunos pies de longitud, y cuélguese de cordones de seda, tocando por algunos instantes uno de sus estremos con un tubo de lacre frotado. Si se examina en seguida el estado del vidrio, se hallará que á cierta distancia del estremo tocado tiene la misma electricidad que el lacre. En esta parte sucede otra que tiene una electricidad contraria, pero mas débil, y despues otra electrizada como el lacre, pero aun mas débilmente, y asi hasta el fin, por medio de alternativas mas ó menos estensas, mas ó menos numerosas, segun la fuerza de la electricidad empleada. He aqui exactamente los puntos consiguientes

del iman, sin otra diferencia que la electricidad del lacre pasa desde luego al vidrio, y se estiende en él hasta cierta distancia, porque ni uno ni otro cuerpo se opone de un modo invencible á la transmision directa de la electricidad, en vez de que las partículas del hierro son absolutamente impermeables respecto al magnetismo. Por esta razon en las barras magnetizadas la primera alternativa adquiere siempre un magnetismo contrario al del polo del iman que ha tocado, en lugar de que la primera alternativa de electricidad es de la misma naturaleza que en el lacre.

Generalmente todos los fenómenos de composicion y descomposicion que nos han presentado las dos electricidades pueden reproducirse por los dos magnetismos, sin mas diferencias que las que resultan de una impermeabilidad absoluta; y como esta comparacion es muy á propósito para hacer conocer la verdad de la teoría, vamos á presentar algunos ejemplos.

Colóquese un iman AB, fig. 24, en una situacion horizontal, y sobre su polo A cuélguese á alguna distancia verticalmente un arambre de hierro delgado y muy flexible ab, que tenga tres ó cuatro centímetros de longitud; despues, tomando otro arambre semejante $a'b'$, y manteniéndole horizontalmente, preséntese su estremo b' al estremo inferior b del primer arambre, y se obtendrá una repulsion; preséntese en seguida al estremo superior a, y habrá atraccion. La razon es muy sencilla; los magnetismos naturales del arambre ab se descomponen instantáneamente por la influencia del polo A, en que domina uno de estos magnetismos. De esta manera adquiere este arambre dos polos, uno b contrario á A, y el otro a de la misma naturaleza; lo mismo sucede al segundo arambre $a'b'$, y asi acercando b' á b se presentan uno á otro dos magnetismos del mismo nombre, y debe verificarse la repulsion; y por el contrario, cuando se presenta b' á a, los magnetis-

mos son diferentes y debe haber atraccion. He aquí una representacion exacta de las influencias eléctricas; la única diferencia está en que no se verifica ninguna transmision de magnetismo entre las diferentes partes del arambre *ab*, sino simplemente una descomposicion local en cada partícula; descomposicion en virtud de la cual uno de los dos magnetismos permanece libre en *b* y el otro en *a*, quedando disimulado todo el resto.

Tómense ahora dos láminas de acero AB A′B′, fig. 25, muy delgadas é iguales en longitud, como las que sirven para los muelles de relox; magnetícense ambas de un mismo modo poniéndolas en contacto con el mismo polo de un iman, ó frotándolas en un mismo sentido sobre su superficie; despues, habiendo probado qué peso puede sostener una de ellas, por ejemplo AB, por su polo A, cuélguese de él un arambre de hierro dulce *ba*, cuyo peso sea cincuenta ó cien veces menor. Hecho esto, aproxímese poco á poco la segunda lámina á la primera como si se quisieran sobreponer por los polos de diferentes nombres. Luego que las láminas se hallen en contacto, la adherencia del arambre se hallará entera ó casi enteramente destruida; de modo que el sistema de los dos imanes sobrepuestos no podrá sostener sino una parte infinitamente pequeña del peso que cada uno de ellos hubiera sostenido separadamente. Esta esperiencia es enteramente análoga á la que hemos hecho en el libro cuarto, sobre el contacto de dos láminas de vidrio electrizadas diversamente por su frotamiento mútuo; y la esplicacion de ella es la misma, aplicando á cada uno de los magnetismos libres lo que entonces deciamos de cada electricidad.

Hemos supuesto las dos láminas muy delgadas, á fin de que estando sobrepuestas fuesen casi iguales sus distancias á los diferentes puntos del arambre *ab*. En efecto, esta distancia es inevitablemente mayor respecto á la segunda lámina que á la primera,

tanto como sea su grueso, y por esta razon no pueden destruirse absolutamente las acciones de dos láminas iguales sobrepuestas; pero ya que no depende de nosotros el destruir esta desigualdad, podemos á lo menos debilitarla adelgazando las láminas. Tambien podria suplirse tomando la segunda lámina A′ B′, mas energía que A B: entonces el arambre *ab* caeria por su propio peso, cuando la accion de esta lámina A′ B′, debilitada por el esceso de la distancia, fuese solo igual á la accion de A B; lo cual sucederia, ya en el contacto de las láminas, ya antes. En este último caso, si disminuyese aun la distancia de las dos láminas, la accion de la segunda llegaria á ser preponderante, y el arambre *ab* volveria á adherirse al polo A, con un magnetismo contrario al que tenia antes. Se ve que seria muy fácil variar estos fenómenos; pero las dos esperiencias que acabamos de describir bastan para indicar todas las demas que pueden imaginarse.

Hemos observado ya que un iman nada pierde de su fuerza por la magnetizacion que comunique á un número cualquiera de barras; pero lo que entonces no podiamos pensar, el efecto de esta repeticion, lejos de debilitar, debe mas bien aumentar su energía. En efecto, cuando el polo B de un iman, fig. 27; toca al estremo *a* de una barra, y desenvuelve en él un magnetismo contrario al suyo, este á su vez obra sobre el magnetismo natural del iman que le ha producido, conspirando á escitar en él una nueva descomposicion, que aumenta el magnetismo libre en B. Este aumento produce en la barra *a b* una nueva descomposicion, que vuelve á obrar sobre el polo B; de suerte que por esta reaccion mútua uno y otro adquieren un magnetismo mas intenso que el que adquiririan por la accion directa de B. Esto es enteramente análogo á los aumentos de carga que recibe el disco superior de un condensador por la accion de la electricidad disimulada en el inferior; pero el equilibrio eléctrico se establece ins-

tantáneamente en estos discos, porque estan compuestos de materias á proposito para transmitir la electricidad con una facilidad grandísima, en vez de que el maximum de carga de un iman y de las barras que le tocan se establece con una estrema lentitud. Lo primero porque si las barras son de acero ó hierro duro, su fuerza coercitiva se opone á una pronta descomposicion de sus magnetismos naturales; y lo segundo porque la sustancia del iman opone una resistencia semejante al aumento de su magnetismo. El primer obstáculo se puede destruir haciendo las barras de un hierro muy dulce; pero el segundo es inevitable, y hace que aun en el último caso se necesite mucho tiempo para que el sistema llegue á adquirir todo el desenrollo de magnetismo de que es capaz.

Esta observacion esplica muchos fenómenos importantes. Si se dejase suspensa de un iman natural ó artificial toda la cantidad de hierro dulce que puede sostener, se hallará que cada dia se puede añadir una pequeña cantidad; mas si al cabo de algunas semanas ó de algunos meses se sepára por fuerza todo este hierro, y se trata de volverle á colocar al momento, se verá que el iman no es ya capaz de sostenerle, porque ha perdido instantáneamente todo el esceso de fuerza que habia adquirido por la influencia del hierro. En efecto, bajo esta influencia, sus dos magnetismos, disimulados en parte por los del hierro, podian existir en un estado de descomposicion, que la fuerza coercitiva no basta á sostener por sí sola; el iman, abandonado á sí mismo, debe, pues, volver al maximum de fuerza magnética que corresponde á la naturaleza de su sustancia, es decir, al estado de saturacion; y lo que importa mucho observar es que parece que esta restitucion se verifica instantáneamente.

Se ha hecho una aplicacion muy útil de este resultado para aumentar la fuerza de los imanes naturales ó artificiales, adaptando á ellos lo que se llama

armadura. Consiste esta en dos pedazos de hierro muy blando aplicados á las superficies polares del iman, los cuales, haciéndose magnéticos por influencia, aumentan con el tiempo su energía. Consideremos, por ejemplo, un iman cuadrado A A B B, fig. 26, cuyo polo austral sea A A y el boreal B B, y supongamos que se aplica al primero de estos polos una armadura de hierro dulce A′ A″ A‴, de la forma qne indica la fig. Los magnetismos naturales de este hierro se descompondrán al momento; su magnetismo boreal será atraido por el magnetismo austral que domina en A A, y su magnetismo austral será rechazado; de suerte que el primero dominará en toda la superficie esterior A′ A″ A‴ del hierro, y principalmente en su estremo mas distante A′ A″, que se llama *pie de la armadura.* Cubramos igualmente el polo B B del iman con otra armadura B′ B″ B‴; se verificará en ella una descomposicion semejante, y su pie B′ B″ adquirirá el magnetismo boreal. Al cabo de algun tiempo, la influencia de estas armaduras habrá aumentado sensiblemente la descomposicion del magnetismo en las partículas del iman que encierra, y este será mucho mas fuerte. Es necesario que estas armaduras no sean muy delgadas, porque siendo iguales las demas circunstancias, el desenrollo de magnetismo que puede verificarse en un pedazo de hierro depende de su masa; pero tampoco deben ser muy gruesas, á fin de que la mayor energía de su accion no se halle en su superficie lateral, sino en sus pies A′ A″ B′ B″, pues como veremos luego, esta circunstancia es muy ventajosa. Por lo demas solo la esperiencia puede indicar el grueso mas conveniente para las armaduras de cada iman; pero es evidente que siempre deben ser de hierro dulce, como acabamos de decir, para facilitar la descomposicion de su magnetismo; el acero y el hierro duro serian muy malos para este efecto, á pesar de que algunos autores han aconsejado su uso.

La adicion de las armaduras no solo aumenta la

fuerza del iman por el nuevo desprendimiento de magnetismo que escita en él, sino tambien dando una direccion mejor á las fuerzas magnéticas. Supongamos que hallándose desnudo el iman AABB se quiere usar para magnetizar la barra *ab*, fig. 27, presentando uno de los estremos de esta á su cara boreal BB. Es evidente que la mayor parte de los puntos de esta superficie y de los ulteriores obrarán sobre la barra de un modo muy oblícuo, y por consiguiente tendrán muy poca influencia para descomponer por sus atracciones el magnetismo de las partículas de la barra. Ademas, la superficie austral AA que se halla paralela á la primera contrariará el efecto de esta por su influencia opuesta; y aunque su accion sea mas débil, porque obra mas de lejos, siempre tiene una ventaja con respecto á su direccion, pues forma ángulos mas agudos con la longitud de la barra. Mas cuando la energía de cada polo se transporta en gran parte al pie de cada armadura, si se presenta la barra *ab* en la prolongacion de uno de estos pies, como representa la fig. 26, es claro que la accion de este polo, concentrada, por decirlo asi, obrará mucho menos oblícuamente sobre las partículas de la barra, que al principio la gran superficie BB del imán, y por el contrario la acion del otro polo transportada al pie de este obrará mucho mas oblícuamente sobre la barra que en el caso del paralelismo, y por lo mismo tendrá una influencia mucho menor para contrariar la accion inmediata del pie á que se halla aplicada la barra. Asi que, por este medio se consigue dar á la barra un magnetismo mucho mas intenso que el que adquiriria con el mismo iman desarmado, como puede comprobarse examinando la fuerza directriz de las barras, ó lo que basta en este caso, comparando los pesos que pueden sostener.

Esto es lo que se puede hacer en la magnetizacion por el simple contacto: pero la necesidad de dar á las brújulas toda la energía posible ha hecho

á los físicos tentar otros muchos métodos.

En el primer método, que ha sido por mucho tiempo casi el único que se ha usado, se hacia correr por ángulos rectos la lámina ó barra que se queria magnetizar, sobre uno de los polos de un iman natural ó artificial. Para valuar el efecto de este método, consideremos la lámina *ab*, fig. 28, cuando su estremo *b* empieza á aplicarse sobre el polo A del iman A B, y para fijar las ideas, supongamos que A sea el polo austral de este iman. En este caso, siendo superior la accion austral de la parte C A que la boreal de la parte C B, se verificará en *b* una descomposicion de los magnetismos naturales de la lámina; el magnetismo austral de cada partícula será rechazado hácia *a* y el boreal atraido hácia *b*, en cuyo punto se formará un polo boreal. Pero luego que separándose el polo A del estremo *b* empiece á tocar los demas puntos de la barra, producirá sucesivamente en cada uno de ellos un efecto exactamente semejante, es decir, atraerá el magnetismo boreal de cada partícula hácia el sitio en que se halle entonces, y rechazará el fluido austral. Por consiguiente, destruiria con esta repulsion la primera descomposicion de magnetismo que habia escitado por su contacto en el estremo *b*; y á medida que avance sobre la lámina destruirá sucesivamente por su influencia los efectos que ha ido produciendo en los puntos tocados; pero al llegar al estremo *b* no se verificará esta destruccion, y al separar la lámina quedará en el estado de magnetismo boreal. La accion de este método se limita poco mas ó menos á este último efecto; y por consiguiente no se debe esperar de él un resultado mucho mayor que del simple contacto de que ya hemos hecho uso, que es lo que en efecto confirma la esperiencia; pues comparando los resultados obtenidos por este método con los que dan los que vamos á describir, se ve que no puede magnetizar hasta la saturacion sino agujas de muy poco grueso.

Tiene tambien la desventaja de producir fácil-

mente y con mucha frecuencia puntos consiguientes del mismo modo que el simple contacto, sobre todo si la barra que se quiere magnetizar es larga y de un acero duro, y se tiene el iman mucho mas tiempo sobre unos puntos que sobre otros. Esta última circunstancia basta seguramente por sí sola para producirlos; porque si se toma una lámina de acero magnetizada regularmente, es decir, que en cada mitad solo tenga una especie de magnetismo, y se aplica el polo de un iman á cualquiera punto de su longitud, se producirá en él un polo contrario al que se ha aplicado, siempre que la accion del iman sea mas enérgica que la de la lámina. Aun si el iman es muy enérgico, y la lámina delgada, basta aplicarle en medio de su longitud para originar un polo en este punto y dos polos contrarios en los estremos, como se puede comprobar por medio de la aguja de prueba α β, fig. 22.

El método de magnetizar que acabamos de describir presenta un fenómeno muy digno de atencion. Cuando se ha hecho correr la lámina *a b* sobre uno de los polos de un iman muy fuerte, por ejemplo, sobre su polo boreal, y por consiguiente ha recibido un magnetismo bastante enérgico, si se la hace correr en toda su longitud y en la misma direccion sobre el polo homólogo de un iman mas débil, parece á primera vista que esta operacion deberá aumentar el estado magnético de la lámina ó cuando mas, dejarle como está. Pues en vez de suceder asi, se vé que le disminuye reduciéndole exactamente al punto que tendria si la lámina se hubiese magnetizado solo sobre el iman mas débil. Para concebir este fenómeno, es preciso tener presente que el segundo iman al tocar sucesivamente cada punto de la primera mitad de la lámina, hace nacer en él por el momento un magnetismo contrario al que habia dejado el primer iman; á lo menos suponiendo el segundo formado de un hierro bastante duro para que su magnetismo no se destruya por el de la la-

mina. Esta inversion se verifica siempre, aunque el segundo iman sea mas débil que el primero, porque obra por su contacto inmediato sobre cada punto, en vez de que el primer iman ha producido el magnetismo definitivo por su influencia á distancia. Asi á medida que el segundo iman corre sobre la primera mitad de la lámina por su polo boreal, cada punto de los que toca es conducido primero al estado natural, despues al austral, y últimamente recibe por influencia á distancia el grado definitivo de magnetismo boreal que este iman puede darle. Pero estas variaciones sucesivas de magnetismo libre, no pueden verificarse en la primera mitad de la lámina sin dar orígen á otros correspondientes sobre la segunda mitad. Se ve, pues, que habiendo sufrido la barra esta accion perturbatriz sobre toda su longitud debe hallarse precisamente en el mismo grado de magnetismo definitivo que si solo se la hubiese tocado con el segundo iman. Tambien se ve que esta disminucion no se verificará si el polo boreal del segundo iman no tocase la lámina sino en su mitad austral; pues entonces mas bien aumentaria que disminuiria el magnetismo de esta. Lo mismo sucederia si el magnetismo de la lámina fuese bastante fuerte para destruir el del segundo iman é invertir sus polos, como sucederia si este iman estuviese hecho de un hierro muy dulce, en que pudiera hacerse con una gran facilidad la descomposicion y recomposicion de los magnetismos naturales; pues entonces, á medida que pasase sobre los diversos puntos de la lámina, adquiriria momentáneamente por el contacto un magnetismo contrario al del punto que tocase; y por consiguiente su reaccion se dirijiria á aumentar la especie de magnetismo que este punto poseyese. En este caso el iman seria como una armadura movible que se aplicase sucesivamente á los diversos puntos de la lámina; y me parece indudable que estas fricciones reiteradas en vez de disminuir el magnetismo de la lámina en breve le conducirian á su maximum.

Despues de haberse hecho muchos esfuerzos inútiles para modificar y perfeccionar la magnetizacion por el simple contacto, el primer paso hácia métodos mejor combinados y mas ventajosos fue dado en 1745 por el fisico inglés Knight. Colocaba una á continuacion de otra dos barras fuertemente magnetizadas, uniendo el polo norte de la una con el polo sur de la otra; en seguida ponia sobre estas barras en la longitud una barrita de acero templado con el temple de cereza claro, cuya mitad correspondiese al punto de union de las dos barras; entonces, separando estas, las hacia correr cada una por su lado hasta los estremos de la barrita, que por este método adquiria una fuerza magnética, mayor que la que se habia obtenido hasta entonces.

En esta disposicion cada iman obra sobre la mitad de la barrita que recorre, como en el primer método; pero en aquel caso, la influencia de un mismo iman obraba sola sobre toda la estension de la lámina para desenrollar los dos magnetismos, en vez de que en este método la presencia del otro iman favorece la descomposicion, pues las influencias de ambos conspiran á un mismo efecto en todos los puntos intermedios, y la especie de magnetismo que uno atrae hácia un estremo de la barra es rechazado hácia el mismo estremo por el otro. Empleando este método, y haciendo uso de grandes barras fuertemente magnetizadas, se ve que las barritas pequeñas y poco gruesas adquieren con corta diferencia el maximum de magnetismo; pero es imposible magnetizar hasta la saturacion por este método una barra un poco larga.

Las barritas de Knight, que se esparcieron en todos los gabinetes de fisica, impelieron en aquella época á muchos fisicos á buscar otros medios para obtener el mismo grado de magnetismo en barras mayores. Duhamel, individuo de la academia de ciencias, habiéndose reunido con Antheaume para hacer esta investigacion, llegó á obtener su deseo del modo siguiente.

Colocó dos barras de acero de igual longitud A B A′ B′, fig. 29, paralelamente una á otra, uniendo sus estremos por medio de paralelipípedos de hierro muy blando, F, F′, de modo que formasen un paralelogramo rectángulo. Tomando en seguida dos hacecillos de barritas *a b a′.b′*, ya magnetizadas, reunió los polos de diferentes nombres hácia el medio de una de las barras de acero, é inclinando despues estos dos hacecillos como manifiesta la figura, los hizo correr cada uno á su lado hasta los estremos de la barra; con lo cual, repitiendo sucesivamente estas fricciones sobre ambas, obtuvo un grado de magnetismo considerable. En este método, cada hacecillo magnetizado obra tambien sobre la mitad de la barra que recorre, como en el primero; y el emplear dos hacecillos en vez de uno, presenta la misma ventaja que en el método de Knight; pero ademas la aplicacion de las barritas de hierro dulce es una innovacion muy importante. Luego que las barras de acero han adquirido algun grado de magnetismo, estas barras de hierro se magnetizan tambien por influencia, obran sobre las de acero como unas verdaderas armaduras; fijan en cada uno de sus estremos el magnetismo ya desenrollado, le disimulan, y dan de este modo mayor facilidad á los hacecillos para producir una nueva descomposicion de magnetismo por medio de una nueva friccion. No habia mas que un paso que dar para que este método adquiriese todo el grado de perfeccion de que es susceptible, esto es, debia sustituirse á las barritas de hierro fuertes imanes opuestos por sus polos que retuviese y disimulasen con mas energía aun el magnetismo ya descompuesto por los hacecillos, que es lo que ha hecho Æpinus, como veremos muy pronto. Pero á falta de un fuerte iman, el método de Duhamel es el mejor que se puede emplear para magnetizar las agujas de brújulas, y las láminas que no tengan mas de dos ó tres milímetros de grueso, con tal que los hacecillos que se empleen

estén fuertemente magnetizados.

Casi al mismo tiempo que Mr. Duhamel se ocupaba en París de esta investigacion, trabajaban con el mismo objeto en Inglaterra lo Sres. Michel y Canton.

El primero hacia uso de dos hacecillos de barras fuertemente magnetizados, y unidos entre sí paralelamente, de modo que estuviesen colocados en cada estremo los polos de un mismo nombre, quedando entre ellos un intervalo de 7 á 8 milímetros. En seguida colocaba muchas barras iguales en línea recta, y hacia correr á ángulos rectos uno de los estremos del doble hacecillo á lo largo de la línea formada por las barras que queria magnetizar; y hallaba que por este método las barras intermedias de la cadena adquirian una gran fuerza magnética, aunque este grado de magnetismo no da jamás el maximum posible de saturacion.

Las diferentes barras puestas en contacto por sus estremos hacen aqui el mismo efecto que las barritas de hierro dulce empleadas por Duhamel; son verdaderas armaduras, solo que como la naturaleza de su sustancia no permite en ellas el libre desenrollo del magnetismo, no se magnetizan, y no obran sino en cuanto las tocan los hacecillos. Asi se concibe por qué se magnetizan fuertemente solo las barras intermedias de la serie, porque estas son las unicas que tienen armaduras. En esto el método de Michel es igual al de Duhamel, y tal vez inferior; pero ofrece otra modificacion que merece examinarse, y es el uso de dos hacecillos paralelos, aproximados á una distancia constante por sus polos opuestos, y que corren simultáneamente por toda la estension de las barras. Para concebir claramente el efecto de esta disposicion, representemos los dos hacecillos por A B B′ A′, fig. 30: supongamos que sus polos corren sobre la barra de acero α B, y analicemos su accion sobre los puntos de ella comprendidos, ya dentro ya fuera del intervalo que comprenden los dos hacecillos.

Consideremos primeramente el hacecillo A B, que supondremos para mayor sencillez que no tiene puntos consiguientes, de suerte que su mitad C B mas distante de la barra posea el magnetismo boreal, y la parte C A mas inmediata el magnetismo austral. Sea *m* una molécula cualquiera de la barra; todos los puntos del hacecillo A B ejercerán sobre los magnetismos naturales de esta partícula una accion boreal ó austral, conspirando á separarlos, cada uno en su sentido. Pero si las dos mitades del hacecillo poseen un grado de magnetismo igual poco mas ó menos, como debe ser, si el punto de indiferencia cae hácia el medio de su longitud, es evidente que las acciones australes deberán vencer á las otras, por estar los puntos que las producen mas inmediatos á la partícula *m*; de suerte que la accion total del hacecillo A B tendrá por resultante una fuerza austral, dirigida segun cierta línea *o m*, que cortará á A B en su parte austral, á corta distancia de su estremo; porque en los imanes que no tienen puntos consiguientes, la cantidad de magnetismo libre es mayor en los estremos, y desde ellos va decreciendo hácia el medio con una estrema rapidéz, del mismo modo que la electricidad libre en las turmalinas y en las pilas eléctricas aisladas.

Si consideramos ahora la accion del otro hacecillo A′ B′ sobre la misma partícula, veremos igualmente que resultará una fuerza boreal, única, cuya direccion *mo* cortará este hacecillo en su parte boreal á poca distancia de su estremo.

Para ver el efecto que producen estas dos fuerzas en la direccion de la longitud de la barra α B es necesario descomponerlas en este sentido. En este caso, representándolas por *mr mr′*, cada una de ellas dará una fuerza *mf mf′* perpendicular á la direccion de la barra, y otra *ms*, *mn*, boreal ó austral en la direccion de su longitud; siendo estas últimas las únicas que nos importa considerar, puesto que ellas solas son las que producen la descomposicion

longitudinal del magnetismo. Ahora bien, la simple inspeccion de la figura hace ver que si la molécula *m* se halla situada entre los hacecillos, las dos fuerzas de que hablamos conspiran á la descomposicion de sus magnetismos naturales, procurando una y otra dirigir su magnetismo boreal hácia el estremo B de la barra, y su magnetismo austral hácia el estremo *a*. Tambien es evidente que este efecto se verificará del mismo modo en todas las demas partes de la barra á donde se traslade el conjunto de hacecillos. Si por el contrario la molécula que consideramos estuviese situada fuera del intervalo que comprenden, por ejemplo, en *m'*, las acciones longitudinales de los hacecillos se contrariarán en lugar de concurrir á un mismo fin, siendo superior la accion del hacecillo mas inmediato A' B' por su proximidad, resultaria una descomposicion de magnetismo *a' b'*, contraria á la que se verifica en la molécula *m* y al estado definitivo del magnetismo de la barra. Pero esta descomposicion, producida por la diferencia de las fuerzas, será siempre mas débil que la primera producida por su suma, sobre todo cuando los hacecillos esten bastante inmediatos, porque entonces sus influencias contrarias vendrán á ser casi iguales sobre los puntos de la barra separados de ellos por poco que lo esten. Asi el débil desenrollo de magnetismo que resulte en *m'* no podrá resistir á la accion conspirante de los dos hacecillos, cuando transportadas sobre el punto *m'* se halle este comprendido entre ellos; y recíprocamente entonces no podrán destruir en *m* el desenrollo de magnetismo que han producido obrando sobre él por acciones conspirantes. Repetidas muchas veces de un estremo á otro de la barra fricciones de este género, conspiran, pues, siempre á escitar en ella un desenrollo creciente de magnetismo; y en efecto, la esperiencia prueba que repitiéndolas llega á ser muy considerable. Para que sea igual en las dos mitades de la barra se aplica al centro el conjunto de hacecillos, y

se hace un número de fricciones igual á cada lado; y volviendo al centro los dos hacecillos se levantan perpendicularmente para no destruir el efecto lateral producido anteriormente. Este método, llamado por su inventor *de doble toque*, ha tenido mucha celebridad.

Canton trató de hacer en él una modificacion, que no era nueva sino en la apariencia, formando como Duhamel un paralelogramo rectángulo, uniendo los estremos de dos barras de acero por medio de pedazos de hierro dulce, tocando estas barras con dos hacecillos paralelos, reunidos segun el método de Michel; y en fin, separando estos hacecillos, inclinándolos á una y otra parte sobre las barras, y haciéndolos correr uno á cada lado hasta los estremos. Pero segun lo que hemos visto antes acerca del efecto de las fricciones repetidas con imanes de fuerza desigual, es claro que la última operacion hecha con los hacecillos inclinados es la única que determina el estado magnético de la barra, pues como vamos á ver, da mas magnetismo que la otra. Asi el uso anterior del doble toque era enteramente inútil; y la operacion despojada de esta superfluidad no es otra cosa que el método de Duhamel.

Æpinus hizo una modificacion mucho mas feliz y mejor calculada en el método de Michel. Dejó á una pequeña distancia los polos de los hacecillos sin separarlos nunca; pero los inclinó en sentido contrario como habia hecho Duhamel, y como representa la fig. 31. Por este medio la resultante de sus acciones sobre cada molécula m se hace mas oblícua sobre la superficie de la barra, y por consiguiente la parte de esta resultante que se descompone en el sentido longitudinal se hace mas considerable. Es verdad que al mismo tiempo se debilita la accion propia de cada punto del hacecillo, porque se hace mayor su distancia á la molécula m, de suerte que no se debe aumentar indefinidamente la inclinacion. La esperiencia sola puede indicar en esta parte el li-

mite mas favorable: Æpinus se decidió por una inclinacion de 15 á 20 grados sobre la superficie de la barra; y en efecto, es el valor que parece mas conveniente, aunque segun la naturaleza del maximum, una pequeña variacion en el ángulo no cambia sensiblemente el resultado. Æpinus unió á esta modificacion el uso de las armaduras de hierro dulce de Duhamel, á las que sustituyó con ventaja dos fuertes imanes opuestos por sus polos, como hemos indicado ya. La combinacion de estos dos métodos compone el que lleva su nombre. Esperimentando los resultados que produce se halla que tiene ventaja sobre los otros métodos, cuando con haccecillos de poca fuerza magnética se quieren magnetizar barras muy grandes; pero tiene algunos inconvenientes inevitables que conviene observar. El primero es que nunca produce un desenrollo de magnetismo perfectamente igual en las barras á que se aplica. En efecto, si despues de haber efectuado la magnetizacion se colocan estas barras debajo de una hoja de papel, sobre la cual se hayan esparcido limaduras de hierro muy finas, se ve por el modo de agruparse estas que el punto de indiferencia no cae exactamente en medio de la barra, sino que se halla algunos milímetros mas inmediato al estremo que se ha magnetizado el último. Esta observacion es de Coulomb.

En segundo lugar parece que el método de Æpinus produce con mayor facilidad que el de Duhamel puntos consiguientes en las láminas muy largas; y aunque á decir verdad, estas alternativas tienen siempre poca energía, sin embargo, disminuyen la fuerza directriz; lo cual es un inconveniente muy grande en la construccion de las agujas de brújula. Otro tanto puede decirse de la pequeña desigualdad que acabamos de notar en la distribucion del magnetismo; y por consiguiente para magnetizar las agujas de brújula es mejor emplear el método de Duhamel, que se halla exento enteramente de estos

dos defectos, reservando el de Æpinus, para las grandes barras á que quiera darse una fuerza magnética considerable, pues en este caso importa poco que su centro magnético se halle ó no colocado en medio de su longitud.

Tomando, pues, de cada uno de estos métodos lo mas ventajoso, y procediendo en la práctica con arreglo á todos los conocimientos que pueden resultar de una dilatada esperiencia, Coulomb se ha decidido por las siguientes disposiciones.

Para formar los hacecillos fijos emplea en cada uno diez barritas de acero al temple de cereza claro, de cinco ó seis decímetros de largo, quince milímetros de ancho y cinco de grueso; las magnetiza primeramente cuanto puede con un iman natural ó artificial: despues, reuniéndolas por los polos del mismo nombre, forma dos capas de á cinco barras cada una, separadas entre sí por medio de unos pequeños paralelipípedos rectángulos de hierro muy dulce, que sirven como de una armadura comun, y salen un poco mas allá de sus estremos. Véase la figura 32.

Los hacecillos que han de correr los componen ordinariamente de cuatro barritas de acero del mismo temple que las anteriores, de cuatrocientos milímetros de largo; quince de ancho y cinco de grueso; y despues de haberlos magnetizado todo lo posible reune dos por su ancho y dos por su grueso; lo cual da á cada hacecillo treinta milímetros de ancho y diez de grueso.

Estos hacecillos, ya fijos, ya movibles, se componen de un acero muy comun en el comercio, y conocido en él con el nombre de acero sellado con siete estrellas. Su calidad es mediana; pero Coulomb ha observado, y antes de él se habia hecho ya, que todas las clases de acero, á no ser de muy mala calidad, toman con corta diferencia el mismo grado de magnetismo. Yo advertiré solamente que como las barras se encorvan siempre al tiempo de templar-

las, se las puede dar primeramente un temple durísimo, y despues recocerlas solo hasta la primera tinta de amarillo, pues este recocido les da bastante maleabilidad para que se puedan enderezar, dejándoles la fuerza coercitiva suficiente para conservar el magnetismo.

Para magnetizar una barra por medio de este aparato se colocan los hacecillos mayores en una misma línea recta, de modo que se miren sus polos norte y sur, y esten separados uno de otro á una distancia igual poco mas ó menos á la longitud de la barra, colocando en seguida cada estremo de esta sobre una de las armaduras, de manera que solo descanse en ellas como unos cuatro ó cinco milímetros. Hecho esto se colocan en su centro los hacecillos movibles, inclinándolos á ambos lados en sentidos contrarios, de modo que formen con la barra un ángulo de 20 á 30.° Si se quiere emplear el método de Duhamel, se hace correr cada hacecillo por el lado en que se encuentra hasta el estremo de la barra; mas si se quiere usar el de Æpinus no se separan, sino que se coloca entre ellos un pedacito de madera ó cobre que mantenga sus polos opuestos á una distancia de cinco ó seis milímetros; y conservándolos asi, con la misma inclinacion que en el otro método, se les hace correr sucesivamente desde el centro á cada estremo, repitiendo las fricciones de modo que su número sea igual en cada mitad de la barra, y en la última que los conduce al centro de ella se levantan perpendicularmente á su longitud, y se repite la operacion por la otra cara de la barra.

Si las que forman los hacecillos no han podido desde luego magnetizarse hasta la saturacion, como generalmente sucederá no pudiendo hacer uso de un aparato de esta especie, su conjunto desenrollará en las barras que sufran su accion un magnetismo mayor que el que ellas mismas poseen. En tal caso se emplean estas nuevas barras para formar

otros hacecillos mas fuertes que los primeros, se deshacen estos, y sujetando sus barras á la accion de los nuevos se aumentará aun su magnetismo libre. Si aun no se ha conseguido el maximum de energía se repetirá la operacion tercera ó cuarta vez, y al fin se obtendrán hacecillos tan fuertes como se deseen.

Hemos dicho que cada hacecillo libre se compone solo de cuatro barras; sin embargo, cuando las que se quieren magnetizar son muy grandes es necesario reunirlas en mayor número, y disponerlas como por gradas de diez ó doce milímetros en la direccion de su longitud, como representa la fig. 33. Esta disposicion se funda en que el mayor desenrollo de magnetismo se verifica siempre hácia el estremo de las barras; en este caso la mas inmediata á la barra central contribuye á mantener, y aun á aumentar en su estremo el desenrollo de magnetismo que hay ya en él; la tercera barra hace el mismo efecto sobre la segunda, y asi sucesivamente.

Coulomb ha comprobado todas las consideraciones teóricas que acabamos de esponer por medio de esperiencias muy exactas, en que ha aplicado los diversos métodos de magnetizacion á barras de igual tamaño y naturaleza, cuya intensidad magnética ha calculado despues por medio de las oscilaciones horizontales, como hemos esplicado en el capítulo 3.°

Estas esperiencias manifiestan que los métodos de Duhamel y de Æpinus son superiores á todos los demas, por cuanto dan un grado igual de magnetismo con un número mucho menor de barritas movibles; y ademas se ve que estos dos métodos son igualmente buenos, aplicados á láminas cuyo grueso no esceda de uno ó dos milímetros; pero que tratándose de barras mas gruesas aventaja el de Æpinus indudablemente. Fuera de esto seria inútil dar mas de nueve ó diez milímetros de grueso á las barras de los aparatos magnéticos, pues la esperiencia prueba que se obtiene una fuerza mucho mayor formando un hacecillo grueso por medio de la re-

union de muchas barritas magnetizadas separadamente; lo cual proviene sin duda de que á cada una de estas en particular se les puede comunicar un magnetismo mucho mas enérgico que el que se le comunicaria hallándose colocada en el centro de una barra mas gruesa.

CAPITULO V.

Distribucion general del magnetismo libre en los hilos magnetizados por el método del doble toque. Leyes de las atracciones y repulsiones magnéticas.

Si despues de haber magnetizado por el método de Duhamel ó el de Æpinus un hilo de acero de una ó dos líneas de diámetro y quince ó veinte pulgadas de longitud, se trata de examinar los pesos que puede sostener por medio de su atraccion en diferentes puntos, se halla que estos pesos van en aumento desde los estremos hasta una distancia de cuatro ó cinco líneas; despues de lo cual disminuyen rápidamente; de suerte que son casi insensibles pasando de dos ó tres pulgadas. Hállase ademas que estos pesos son iguales hácia cada estremo del hilo. Esto prueba, como ya habiamos previsto, que las cantidades mayores de magnetismo libre se hallan hácia los dos estremos del hilo á una corta distancia de ellos, y que en ambos son sensiblemente iguales; distribucion enteramente análoga á la de la electricidad en las turmalinas y en las pilas.

Este resultado importante se prueba aun mejor por medio de la torsion. Se coloca una aguja de acero bien magnetizada por el método de Duhamel ó de Æpinus en el estrivo de la balanza magnética; en la direccion del meridiano magnético de esta aguja, que debe corresponder igualmente al cero de torsion, se coloca una regla vertical de madera ó cobre de una ó dos líneas de grueso, de modo que venga

á aplicarse á ella el estremo de la aguja cuando se halla conducida á su meridiano por la torsion. Al otro lado de esta regla se hace correr verticalmente un hilo de acero magnetizado, como hemos supuesto antes, empezando, por ejemplo, desde su polo homólogo al de la aguja. Esta es rechazada al principio por la repulsion que se verifica entre los magnetismos de una misma naturaleza; pero se la pone á la fuerza en contacto con la regla torciendo el hilo de suspension, de modo que no quede mas que el grueso de la regla ó dos líneas de distancia entre los puntos mas próximos del hilo y de la aguja. Ahora bien, como el hilo de acero que colocamos detras de la regla está vertical, y la aguja horizontal, todos los puntos que se hallen á una y otra parte á cuatro ó cinco líneas de distancia del punto de interseccion contribuyen muy poco á la repulsion, á causa de su separacion y de la oblicuidad con que obran; de suerte que la fuerza de torsion necesaria para mantener el contacto debe depender esencialmente de la cantidad de magnetismo libre que existen en cada aguja desde el punto de contacto hasta dos ó tres líneas á un lado y otro de este punto. Asi, haciendo correr verticalmente el hilo de acero á lo largo de la regla, y presentando sucesivamente todos sus puntos á esta pequeña distancia de dos líneas de la aguja, cuya accion es siempre constante; las fuerzas de torsion que sea necesario emplear para mantener el contacto, serán una medida muy aproximada de la intensidad del magnetismo libre en el punto del hilo que forma la interseccion. Haciendo, pues, esta esperiencia se halla que si cuando el punto de interseccion se encuentra á dos líneas del estremo del hilo, es necesaria una torsion de ocho círculos, no se necesitan sino dos ó tres cuando se halla á dos pulgadas, y que cuando el plano horizontal de la aguja está á mas de tres pulgadas del estremo del hilo, la repulsion es casi nula. Asi vemos que el magnetismo libre se

encuentra reunido casi totalmente en las tres primeras pulgadas, empezando á contar desde cada estremo. Lo mismo se observa respecto á la atraccion de los polos de nombre contrario: y si el hilo se ha magnetizado de una manera regular por el método del doble toque, se halla que las atracciones de un polo son sensiblemente iguales á las repulsiones del otro. Pero es necesario advertir que para que se pueda contar con los resultados de una esperiencia semejante, es preciso emplear agujas é hilos de un acero escelente, fuertemente templadas, y no darles una carga muy grande de magnetismo; pues sin estas precauciones, no hallándose los dos puntos en que se verifica la interseccion sino á dos líneas de distancia, las influencias recíprocas de la aguja y del hilo podrian desenrollar en ellos nuevas cantidades de magnetismo, y entonces los resultados de sus atracciones no serian comparables entre sí.

Supongamos ahora que en vez de emplear en esta esperiencia una aguja y un hilo se emplean dos hilos iguales, de 24 pulgadas de longitud, dispuestos de modo que el punto de interseccion se halle con corta diferencia á diez ó doce líneas de distancia del estremo de cada uno de ellos, juntándolos por sus polos homólogos: en este caso habrá repulsion. Ahora bien, esta repulsion será casi enteramente producida por las dos ó tres pulgadas de longitud en que se halla mas desenvuelto el magnetismo libre, y los polos inmediatos serán casi los únicos que contribuyan á ella, pues la accion de los otros se hallará muy debilitada, tanto por la longitud que hemos supuesto á los hilos, como por su direccion, que será muy oblícua, siempre que los dos estremos inmediatos no se separen uno de otro sino á distancias muy pequeñas. Estos estremos se hallarán, pues, entonces en la posicion mas favorable para medir la ley de sus repulsiones á diferentes distancias; pues estando su interseccion en los puntos donde la repulsion es mas enérgica, las demas

porciones de magnetismo libre que se hallan cerca de estos puntos producirán en cuanto á la repulsion casi el mismo efecto que si estuvieran reunidas; de suerte que el fenómeno vendrá á reducirse poco mas ó menos á la accion recíproca de dos puntos cargados con una cantidad dada y constante de magnetismo de un mismo nombre.

En esta esperiencia, cuando la aguja movible se haya separado de la fija, será impelida hácia esta, no solo por la torsion, sino tambien por la atraccion del iman terrestre, que conspira á conducirla al meridiano magnético; asi que, siempre se deberá empezar midiendo esta fuerza directriz á varias distancias, y en seguida se añadirá á la torsion observada para obtener el efecto total de la repulsion de los dos hilos.

Procediendo de este modo con todas las precauciones necesarias para obtener la mayor exactitud, ha hallado Coulomb que la atraccion y la repulsion magnética son inversas de los cuadrados de las distancias, del mismo modo que la atraccion celeste y las atracciones y repulsiones producidas por la electricidad.

CAPITULO VI.

Investigaciones acerca de la intensidad del magnetismo libre en cada punto de una aguja magnetizada hasta la saturacion, por el método del doble toque.

Habiendo hallado métodos seguros para producir en las barras de hierro ó acero todo el desenrollo de magnetismo que pueden adquirir y conservar de una manera durable, vamos á buscar por medio de la esperiencia cuál es entonces el estado magnético de cada uno de sus puntos.

Para mayor sencillez empecemos considerando un hilo de acero cilíndrico A B, fig. 34, de un diá-

metro muy pequeño, y magnetizado de un modo regular por el método del doble toque. Entonces el desenrollo del magnetismo en cada una de sus dos mitades será sensiblemente igual, pero de contraria naturaleza; y disminuirá rápidamente en cada una de ellas desde los estremos hácia el centro. Luego si levantamos en diferentes puntos de este hilo, ordenadas perpendiculares, para representar la intensidad del magnetismo libre, ya boreal ya austral, estas ordenadas serán nulas en el centro, y desde alli irán creciendo igualmente y con lentitud á una y otra parte, hasta cierta distancia, y en seguida aumentarán con rapidez hasta los estremos del hilo, donde llegarán á su maximum. He aqui todo lo que podemos conjeturar con arreglo á nuestras esperiencias anteriores.

Para determinar ahora el valor de estas ordenadas, colguemos de un hilo de seda muy fino una agujita de prueba *a b*, fig. 35, ya magnetizada, y despues de haberla dejado colocar en el meridiano magnético, presentémosla en este meridiano el hilo A B, manteniéndole verticalmente á una corta distancia del polo *a*. Esta operacion no hará variar la direccion de la aguja *a b*; pero si la separamos un poco de su meridiano magnético volverá á él con mas rapidez que si el hilo no se hallase alli, pues se encontrará impelida por las acciones combinadas de la tierra y del hilo. La primera de estas fuerzas puede valuarse fácilmente, haciendo primero oscilar la aguja con sola la influencia del iman terrestre, pues será proporcional al cuadrado del número de oscilaciones que haya en un tiempo dado, por ejemplo, en un minuto. Si se observa del mismo modo el número de oscilaciones que haga la aguja cuando se encuentra solicitada á un mismo tiempo por esta fuerza y por la accion del hilo, se conocerá por el cuadrado de este número la accion total que entonces sufre, y restando de este cuadrado el primero que depende del magnetismo terrestre, se tendrá por separado la

medida de la accion que ejerce el hilo. En este caso, el punto M, situado á la altura de la aguja será el el que ejerza una accion mayor, tanto por ser el mas inmediato á la aguja, cuanto porque la atrae directamente en el plano que oscila, mientras los demas puntos situados encima ó debajo de este obran de mas lejos y oblicuamente. A la verdad, la influencia de estas dos causas es muy débil en los puntos del hilo que rodean á M; pero si la accion de uno de estos puntos es mayor que la de M, la de otro punto, situado al otro lado y á igual distancia, será mas débil una cantidad igual poco mas ó menos, pues cualquiera que sea la naturaleza de la curva A′ C B′, fig. 34, que une las diferentes ordenadas, siempre que se considere un arco muy pequeño de ella, se le puede sustituir la recta que toque á este arco. Por consiguiente, en virtud de esta sustitucion, la semisuma de las acciones equidistantes, ejercidas por los puntos inmediatos á M, será tambien con corta diferencia igual á la de M. Síguese de aqui que en cada esperiencia la parte del hilo cuya accion es mas enérgica, ejercerá una accion total, casi exactamente proporcional á la del punto M, y por consiguiente á la cantidad de magnetismo que se halla en él en el estado de libertad. Sin embargo, es necesario no estender esta proporcionalidad hasta el estremo del hilo ni aun hasta una pequeña distancia de él, pues en este caso hallándose los puntos colocados mas allá del hilo, bastante inmediatos para que su influencia sea sensible, la accion que sufriese la aguja no seria la misma que si estuviese continuado el hilo. Cuando oscila, por ejemplo, delante del mismo estremo, la fuerza que la impele no es mas que la mitad de la que obraria sobre ella, si hubiese en la prolongacion del hilo otro hilo igual; y por lo mismo las fuerzas que se observen entonces serán con corta diferencia la mitad de las que se obtendrian si continuase el hilo con la misma ley de magnetismo que posee. Asi, para que los resultados obtenidos en es-

ta circunstancia sean comparables á los que presenta la aguja oscilando delante de los otros puntos, en que el hilo la solicita por ambos lados, será necesario doblar el número que representa el cuadrado de las oscilaciones. Esto es lo que hacia Coulomb, y por medio de un cálculo exacto puede verse que esta correccion se acerca mucho á la verdad.

Debo prevenir aqui una objecion que podria presentarse naturalmente. Cuando hemos tratado de investigar la ley de las repulsiones y atracciones magnéticas á diferentes distancias, hemos considerado á un tiempo todo el magnetismo de un mismo polo como si obrase enteramente en el plano horizontal en que oscila la aguja movible, hallándose concentrado en un solo punto, cuando ahora decimos que la accion de los diferentes puntos de este polo que se hallan encima y debajo del plano de la aguja estará muy debilitada por la oblicuidad. En nuestras primeras esperiencias el polo de la aguja movible se hallaba siempre separado de la aguja fija á una distancia considerable respecto al espacio en que está distribuido el magnetismo libre; y ahora por el contrario, este espacio es considerable respecto á la distancia de la agujita; modificacion que hace mucho mayor la influencia de la oblicuidad. Por consiguiente la accion de los puntos situados encima ó debajo del plano horizontal de la aguja decrece con mucha mayor rapidez, y la accion total es siempre con corta diferencia la misma que si el hilo se hallase continuado indefinidamente á una y otra parte de este plano con la misma intensidad magnética que posee el punto que se halla delante de él. He aqui porque la accion observada de este modo es sensiblemente proporcional á la cantidad de magnetismo libre que existe en este punto.

Al hacer estas esperiencias espreciso tomar dos precauciones importantes; la primera es emplear hilos bastante largos para que cuando se observe la accion de uno de los estremos sobre la aguja no haya que

tener en consideracion la del otro estremo; y la segunda que la aguja, aunque pequeña y fácilmente movible, sea sin embargo bastante fuerte y hecha de un acero con un grado conveniente de dureza para que su magnetismo no sea sensiblemente modificado por la accion del hilo, pues si esto sucediese, las esperiencias hechas delante de diversos puntos no serian comparables entre sí, variando la parte de la accion que depende de la aguja, como sucedió á Coulomb en sus primeras esperiencias, en que empleaba una agujita de dos líneas de largo, colocándola á tres líneas de distancia del hilo. Esta aguja, abandonada á la accion del iman terrestre, daba señales muy débiles de magnetismo; pero luego que se hallaba á las tres líneas delante del hilo, su estado magnético aumentaba considerablemente, y presentándola á uno y otro estremo del hilo cambiaba súbitamente de polo.

Advertido por estos fenómenos, empleó Coulomb una aguja mas fuerte, que tenia tres líneas de diámetro y seis de longitud; el diámetro del hilo magnetizado era de dos líneas y su longitud de 27 pulgadas, pesando cada pie 865 granos. Temiendo no produgese alguna alteracion en el magnetismo de la aguja, la presentó á ocho líneas de distancia, y contó el número de oscilaciones que hacia en un minuto hallándose delante de diferentes puntos. Ademas habia observado anteriormente el número de oscilaciones que hacia en igual tiempo por efecto de la sola accion del magnetismo terrestre; y por consiguiente la diferencia de los cuadrados de estos dos numeros espresaba en cada esperiencia la accion recíproca de la aguja y del hilo; accion que como hemos dicho antes, debia ser poco mas ó menos proporcional á la intensidad del magnetismo libre en el punto del hilo, delante del cual oscilaba la aguja. Colocando, pues, estos resultados al estremo de las abscisas correspondientes, obtuvo Coulomb la curva de intensidad representada en la fig. 36.

La forma ascendiente de esta curva nos ofrece la confirmacion de todo lo que nos habian hecho creer las esperiencias anteriores respecto á la distribucion del magnetismo libre y á la grande intensidad de su desenrollo cerca de los estremos.

Coulomb volvió á empezar su esperiencia con el mismo hilo variando solo su longitud, y halló que cualquiera que fuese esta, con tal que pasase de seis á siete pulgadas, las tres primeras y las tres últimas daban siempre casi exactamente los mismos resultados que en el hilo de 27 pulgadas; de suerte que la intensidad del magnetismo libre era sensiblemente la misma desde los estremos de estos hilos hasta tres pulgadas de distancia, desde donde se hacia muy débil y casi insensible en todos ellos; ó lo que es lo mismo, la curva de las intensidades no hacia mas que trasladarse á los estremos de los hilos sin cambiar de forma en esta parte; y solo despues de haber bajado mucho hácia el eje, se mantenian mas ó menos desiguales sus ordenadas, de modo que no llegasen á ser absolutamente nulas sino en el centro del hilo. Esta constancia de las ordenadas estremas en todos los hilos de una misma naturaleza y grueso indica con evidencia que el magnetismo libre ha recibido en esta parte un desenrollo de que no puede pasar, resultado que es exactamente conforme á la idea que nos habiamos formado del estado de saturacion. Coulomb halló menos constancia en las pequeñas ordenadas de la curva inmediatas al centro de los hilos, y aun reconoció que en los que eran muy largos, estas ordenadas varían accidentalmente hasta pasar á veces del positivo al negativo; cosa muy sencilla si se considera que todas estas inversiones constituyen otros tantos estados posibles de equilibrio, y que las mas pequeñas circunstancias, como un contacto un poco desigual al tiempo de la magnetizacion y aun la accion propia de los polos del hilo sobre su centro, bastan para producirlas.

Observando la curva de intensidades trazada por

Coulomb, es fácil reconocer que resulta de la combinacion de dos curvas del género de las que los geómetras llaman logarítmicas; las cuales partiendo de los estremos del hilo, tendrian sus ordenadas iguales pero contrarias, fig. 37, y en efecto la variacion de las intensidades calculada de este modo respecto á diferentes distancias del centro, se halla perfectamente conforme con el resultado de la observacion. Esta ley considerada analíticamente indica una distribucion de magnetismo libre exactamente parecida á la de las dos electricidades en una pila aislada cuando la accion absorvente del aire ha igualado las tensiones de sus dos polos; y en efecto, asi debiamos esperarlo de la perfecta analogía que hemos observado antes entre estas pilas y los imanes. Las fórmulas deducidas de esta comparacion dan medios para determinar la carga magnética en hilos de un mismo grueso y diferente longitud ó de una misma longitud y grueso distinto; ó en fin, de una longitud y un grueso cualquiera, suponiéndolos siempre magnetizados por el método del doble toque.

Las esperiencias de Coulomb á que se refieren estos cálculos, ofrecen todas una distribucion de magnetismo igual y contraria en las dos mitades de la aguja, distribucion que en efecto es la mas ventajosa para obtener fuerzas directrices considerables, y que por consiguiente es la que se debe tratar de obtener. Pero la esperiencia enseña que es imposible conseguirlo en las agujas templadas, cuando su longitud es muy grande en comparacion al diámetro de la seccion transversal. En este caso, cualquiera que sea el método de magnetizar que se emplee, se forman en estas agujas muchos centros, cuyo desenrollo se debe probablemente á la reaccion de los polos de la aguja, sobre los puntos inmediatos á su centro; y la curva de intensidades no está situada respecto á cada mitad de la aguja á un solo lado del eje, sino que necesariamente ondula encima y debajo de este, como representa la fig. 38, y por

consiguiente su forma no puede representarse por la misma espresion analítica que la anterior. Por fortuna hay muchos motivos que hacen creer que esta limitacion importa poco. Desde luego no se verifica en las agujas recocidas, como no suceda acaso en las de un tamaño mucho mayor que el de las que se usan ordinariamente; y en cuanto á las templadas, á menos que por alguna razon poderosa se hayan de hacer sumamente ligeras, siempre será ventajoso darlas un grueso suficiente para que el magnetismo libre sea de la misma naturaleza en cada mitad: pues teniendo la misma fuerza coercitiva, el desenrollo de los nuevos centros debilita el momento estático de las fuerzas directrices de cada mitad de la aguja, y hace su accion menos enérgica á igual distancia de los polos. En general es claro que la distribucion del magnetismo en una aguja, y el grado absoluto de saturacion de que es susceptible, dependen no solo de sus dimensiones, sino tambien de la mayor ó menor dureza de su temple. Coulomb ha estudiado la influencia de esta última circunstancia por medio de una serie de esperiencias: de las cuales resulta que es necesario empezar siempre dando á la aguja un temple blanco, cualesquiera que sean sus dimensiones: si su longitud es menor que treinta veces su grueso, se le puede dejar este mismo temple; y si su longitud es mayor es necesario recocerla hasta el grado de rojo oscuro, para evitar los centros multiplos que produciria su gran longitud.

CAPITULO VII.

De la mejor forma que puede darse á las agujas de las brújulas.

Los resultados establecidos en los capítulos anteriores deben servirnos de guia para la construccion de las agujas de las brújulas; y aunque esta aplica-

cion es fácil, sin embargo, es tan importante, que creo debemos detenernos particularmente en ella; y lo haré con tanto mas gusto, cuanto que todavia tendremos aqui por guia á Coulomb.

Las brújulas que usan en general los marinos ya en mar, ya en tierra, se componen ordinariamente de una aguja magnetizada, cuyo centro descansa en un estilete de metal no magnético, haciendo que la aguja permanezca horizontal por medio de un contrapesito colocado sobre uno de sus brazos, y cuyo tamaño y colocacion se varía cuando se pasa á latitudes muy distantes, en que es muy diferente el momento de las fuerzas verticales del magnetismo terrestre.

Cualquiera que sea la forma de la aguja, es fácil determinar sobre su superficie la direccion horizontal de la resultante de las fuerzas magnéticas por el método que hemos esplicado en el capítulo 3.º Si la aguja se moviese sobre su estilete con una perfecta libertad, se colocaria naturalmente de modo que la línea trazada coincidiese con el meridiano magnético, y por consiguiente siempre indicaria exactamente este meridiano. Pero el roce del estilete contra el fondo del casquillo se opone á esta tendencia, y forma asi un obstáculo que es necesario que venza la fuerza directriz de la aguja, de donde resulta que la mejor construccion será aquella en que el roce sea el menor posible y la fuerza directriz la mayor.

Suponiendo que los estiletes y casquillos sean de la misma forma, de la misma naturaleza, y trabajados con igual exactitud, el roce no dependerá sino del peso de la aguja, y se puede determinar por la esperiencia, presentando de lejos á la aguja colocada sobre su estilete un iman que la separe de su meridiano magnético, y observando con qué grado de aproximacion vuelve á él luego que es abandonada á sí misma. En efecto, es evidente que las amplitudes de los arcos, á que se detenga indiferente-

mente en un gran número de esperiencias á una ú otra parte de este plano, deberán ser proporcionales á la energía del roce. Coulomb ha hallado, valiéndose de observaciones de esta especie, que siendo los estiletes muy agudos, y los casquillos formados de una materia bastante dura para que la punta no la altere, el roce es con corta diferencia proporcional á la potencia $\frac{3}{2}$ de las presiones; pero cuando con el largo uso se han desgastado los estiletes, y por decirlo asi, se han acomodado al fondo del casquillo, que es lo mas comun, ha visto que el rozamiento se hace proporcional á las simples presiones. Este es el primer dato de que debemos hacer uso.

Supongamos ahora una aguja magnetizada, de cualquier forma y grueso, colocada sobre un estilete, y sin cambiar nada sus dimensiones longitudinales, dupliquemos su grueso, ó lo que es lo mismo, coloquemos sobre ella otra aguja magnetizada exactamente igual; la presion sobre el estilete y el roce serán dobles que antes; pero no lo será la fuerza directriz, porque el raciocinio indica y la esperiencia prueba que aumenta en una proporcion menor que los gruesos, pues la reaccion mútua de los polos homólogos destruye una parte del magnetismo libre que cada uno tenia. El sistema de las dos láminas sobrepuestas determinará, pues, la direccion del meridiano con menos exactitud que la primera aguja sola: y por consiguiente se ve que siendo iguales todas las demas cosas, es ventajoso emplear en la construccion de las brújulas agujas no muy gordas, limitando su grueso á lo necesario para que no se doblen.

Pasemos ahora á las longitudes, y consideremos el caso en que la aguja por sus dimensiones y su estado físico no posea mas que una sola especie de magnetismo libre en cada mitad. Entonces la ley analítica de las intensidades que hemos obtenido antes manifiesta que á menos que las agujas no sean es-

cesivamente cortas, sus fuerzas directrices son proporcionales á sus longitudes, teniendo el mismo diámetro, y suponiendo que su seccion transversal sea igual en todas partes. En este caso, el peso y el roce que resulta de él son uno y otro proporcionales á las longitudes, y por consiguiente, pasando de cierto límite todas las agujas, cualquiera que sea su longitud, tendrán poco mas ó menos la misma exactitud. Pero para que sea aplicable este principio es necesario limitarse á longitudes tales, que comparadas con el grueso no resulten de ellas muchos centros magnéticos; y el grueso, asi como el estado de recocimiento ó de temple, deberán emplearse de modo que se eviten tales centros, segun las indicaciones dadas en el capítulo anterior. Si el largo de la aguja no llega á ser treinta veces su grueso, será necesario darla un temple blanco antes de magnetizarla; y si por el contrario pasa de las treinta veces será preciso, despues de haberla dado el mismo temple, recocerla hasta el rojo oscuro. En el paso entre estos límites es indiferente emplear uno ú otro método.

Todo esto supone que las agujas no deben tener sino un solo centro magnético; pero si se quieren admitir algunas que tengan muchos centros, acaso podrán tener varias ventajas, compensándose la debilidad que produce la multiplicidad de centros por el aumento que resulta de una fuerza coercitiva mas considerable, y de un desenrollo mayor de magnetismo. En este caso será preciso indagar el grado de temple ó recocimiento que convenga mejor á las proporciones que se hayan adoptado. Parece que Coulomb habia hecho sobre estos puntos una larga serie de esperiencias que se proponia presentar en estados, en los cuales se hubiera visto desde luego cuáles eran las circunstancias mas favorables respecto á cada forma de láminas; pero desgraciadamente no se ha hallado nada en sus manuscritos que estuviese bastante ordenado para poder arreglar es-

te importante trabajo, y por consiguiente este es un objeto nuevo de investigaciones que pueden proponerse los físicos.

Ultimamente, nos falta determinar cuál es la forma mas favorable que puede darse á las agujas. Las mas usadas ó son cilíndricas ó tienen la forma de un paralelogramo ó la de una flecha. Coulomb ha determinado por medio de la esperiencia que con igual peso tienen una fuerza directriz mayor las agujas en forma de flecha: y era fácil preveerlo por la misma razon que le habia determinado á componer sus hacecillos magnéticos en gradas, como hemos esplicado en el capítulo 4.° Por lo mismo se ve que habia desventaja en dar á los estremos de las agujas una forma contraria á la de la flecha, es decir, ensanchada hácia el estremo; forma que aunque alguna vez se ha querido introducir debe desecharse absolutamente.

Las consideraciones que acabamos de esponer pueden adaptarse igualmente á las agujas de inclinacion: pero ademas es necesario aplicarlas los métodos de correccion que hemos esplicado en el capítulo 3.°

CAPITULO VIII.

De la accion de los imanes sobre todos los cuerpos naturales.

Hemos dicho que el hierro, el acero, el niquel y el cobalto eran los únicos metales magnéticos que se conocian hasta ahora, y en efecto, son los únicos que pueden adquirir un estado magnético enérgico y durable. Sin embargo, si se forman con cualquiera otra sustancia agujitas de siete ú ocho milímetros de largo y medio milímetro de grueso, y se cuelgan de un hilo de seda, tal como sale del gusano, entre los polos de dos fuertes imanes, fig. 39, se ve que se colocan constantemente en la direccion de estos

polos; y si se les hace oscilar á un lado y otro de su direccion de equilibrio, sus oscilaciones en presencia de los imanes son mas rápidas que cuando se hallan aisladas en el espacio: estas agujitas son, pues, sensibles á la influencia de los imanes. Esta esperiencia puede hacerse del mismo modo con agujitas de oro, plata, vidrio, madera, y cualquiera otra sustancia orgánica ó inorgánica. Coulomb descubrió estos fenómenos dignos de atencion, y los anunció al instituto en Mayo de 1812.

A primera vista no se presentan mas que dos modos de esplicarlos: ó todas las sustancias de la natura e a son susceptibles de magnetismo, ó todas contienen partículas de hierro ú otro metal magnético que les comunican esta propiedad. Pero la alternativa no es tan cierta como parece desde luego; pues supone que la accion que sufren las agujas es realmente magnética, y esto no podemos asegurarlo positivamente. Cuando vemos que el simple contacto de cuerpos heterogéneos hace desenrollar fuerzas eléctricas sensibles, cuya existencia ni aun habia podido presumirse en mucho tiempo, ¿no debemos considerar como posible que otras circunstancias desenrollen fuerzas semejantes ó análogas, cuyos efectos estremamente débiles no puedan percibirse sino con instrumentos muy delicados? ¿Y la accion sufrida por las agujitas que usaba Coulomb, no podrá provenir de alguna fuerza de esta especie que nos sea desconocida? Es imposible decidirlo en el estado actual de la ciencia.

Parece sin embargo imposible atribuir á una causa semejante la facultad magnética del cobalto y del niquel. He tenido una aguja de niquel, que Mr. Thenard habia purificado con todo el esmero posible: tenia de largo 212,7 milímetros y 6 milímetros de ancho, pesando 5,178 gramos. Construí una aguja de acero de iguales dimensiones, que pesaba 4,586 gramos; y despues de haber magnetizado ambas hasta la saturacion, las hice oscilar hori-

zontalmente en el meridiano magnético. La aguja de niquel dió 10 oscilaciones en 87 segundos, y la de acero en 45,5; y siendo iguales las figuras, los momentos de las fuerzas directrices estan entre sí en razon compuesta directa de los pesos, é inversa del cuadrado del número de oscilaciones, esto es, como 0,3088 á 1 en nuestro caso; por consiguiente la fuerza directriz de la aguja de niquel era casi el tercio de la que tenia la de acero. La proporcion, pues, del hierro que sea necesario suponer en el niquel para producir un efecto semejante, es muy superior á la que se puede suponer con alguna verosimilitud.

CAPITULO IX.

Leyes del magnetismo terrestre á diferentes latitudes.

En el capítulo 3.º anunciamos que la inclinacion, declinacion é intensidad de las fuerzas magnéticas no eran las mismas en todos los puntos de la tierra: ahora conocemos ya todos los métodos necesarios para fijar exactamente el estado actual de estos fenómenos; siendo solamente necesario transportar sucesivamente á diferentes sitios una misma aguja magnetizada ó agujas comparables, y observar los tres elementos que acabamos de decir. Hácia el año 1700, el célebre astrónomo Halley emprendió una esperiencia de este género, habiéndole proporcionado el gobierno inglés un navío, destinado solo á transportarle sucesivamente con sus instrumentos á diversas partes del globo. Pero siendo el objeto principal de las investigaciones de Halley la determinacion de las longitudes por las declinaciones de la brújula, se dedicó especialmente á observar este elemento, que por desgracia parece que es el mas variable de todos. De suerte que cuando en el dia se quiere describir el estado magnético de la tierra, es indispensable recurrir á las observaciones aisladas

de los navegantes mas modernos. Y no habiéndose comparado entre sí las agujas que han usado, ni siendo iguales los modos de observar, se ve que estas diferencias deben producir muchas anomalías aparentes en los resultados, de manera que cuando mas se debe esperar reconocer en ellos las circunstancias mas generales de los fenómenos sin poderlas medir en sus detalles. En fin, lo que aumenta aun las dificultades es que faltan absolutamente observaciones de una gran parte del globo que serian, tanto mas necesarias, cuanto el conjunto de los hechos parece indicar la accion de causas locales muy dignas de atencion, y de que es imposible formar idea de otro modo que por la esperiencia. Por tanto me limitaré aquí á indicar lo que se ha podido reconocer hasta ahora acerca de la marcha general de los fenómenos, sin tratar de reunir estos por medio de cálculos, cuyos datos mas necesarios nos faltarian; y esto bastará para indicar á los viajeros los puntos del globo donde principalmente seria útil redoblar los esfuerzos y multiplicar las observaciones.

Consideraremos primero las desigualdades de la inclinacion magnética en los diversos climas de la tierra; porque este fenómeno parece que varía con el tiempo mucho menos que la declinacion. Para descubrir alguna ley en ellas, lo primero que hay que hacer es determinar los puntos del globo en que esta inclinacion es nula; de suerte que una aguja que antes de magnetizarse se mantiene horizontalmente, permanezca lo mismo despues de magnetizada. La serie de estos puntos forma sobre la tierra una línea curva, que se llama *ecuador magnético*, y que todos los autores han considerado hasta aquí como un círculo máximo inclinado como unos 12° sobre el ecuador terrestre. En efecto, así lo indican todas las observaciones hechas en una estension de mas de 180° de longitud en el océano atlántico, el mar de la India, y la parte del mar

del sur que baña las costas de la América meridional. El nodo occidental de este gran círculo, es decir, su intersección mas occidental con el ecuador, se halla situado como á unos 115°, 34′ de longitud al occidente de París, esto es, en el mar del sur, cerca de la isla de Gallego, á 900 leguas de las costas del Perú; lo cual coloca el nodo opuesto á 295° 54′ minutos de longitud, igualmente occidental. Tal ha sido hasta ahora la opinion general. Pero, ¡cosa admirable! estos elementos faltan absolutamente en todos los puntos del mar del sur, situados mas allá del nodo occidental entre 115 y 270° de longitud; lo cual comprende casi un hemisferio entero de mar. En efecto, discutiendo las observaciones hechas con el mayor cuidado por William, Bayly y Cook en dos barcos distintos, que navegaban con el mismo objeto en el mar del sur en 1777, veo que *uno y otro* han hallado el ecuador magnético á 158° 50′ 9″ de longitud occidental, y á 3° 13′ 40″ de latitud *austral*; mientras que prolongando el círculo que dan las observaciones hechas en el resto del globo, este ecuador deberia hallarse entonces á una latitud *boreal* de 8° 56′ 30.″ Esto nos manifiesta que el ecuador magnético, despues de haber encontrado al ecuador terrestre hácia los 115° de longitud occidental, vuelve á bajar á la parte austral del globo; y como las observaciones de Bayly, confirmadas en esta parte por las de Dalrymple, manifiestan de nuevo la línea sin inclinacion hácia los 7° de latitud boreal en los mares de la China á 256° de longitud occidental, es necesario inferir que entre esta longitud y la de 158° 50′, determinada por la observacion de Cook, el ecuador magnético y el terrestre tienen á lo menos un punto de interseccion independiente del nodo oriental, situado en el mar de la India como á 295° de longitud, y dependiente de la parte circular. Habrá, pues, en todo á lo menos tres nodos, y acaso cuatro, si el ecuador magnético cerca de su nodo occidental se

eleva un poco al norte antes de bajar al sur hácia el archipiálago de las islas de la Sociedad. La figura 40 representa la serie de estas inflexiones, de que hallaremos muy en breve confirmaciones admirables en los efectos que se derivan de ellas.

Cuando se examinan las inclinaciones magnéticas observadas á uno y otro lado de la línea que acabamos de designar, se halla que aumentan á medida que se separan de esta línea. Limitándose á considerar la mitad del globo en que el ecuador magnético parece ser exactamente circular, la cual comprende la Europa, el Africa, el occéano atlántico y las costas orientales de ambas Américas; se ve que la inclinacion permanece constante con corta diferencia en los paralelos situados á igual distancia á una y otra parte de este ecuador; de suerte que siguiendo siempre la misma ley el maximum de inclinacion se verificaria en dos puntos opuestos de la tierra; uno de los cuales situado hácia el norte se hallaria como á 25° de longitud occidental y 90°—12° ó 78° de latitud boreal, y el otro diametralmente opuesto, estaria á 205° de longitud occidental, y 78° de latitud austral. Estos serian, pues, los *polos* del ecuador magnético, y tales son en efecto aproximadamente las posiciones que les han dado los fisicos. Pero limitándose á esta mitad de la tierra, en que parecen mas sencillas las leyes de la inclinacion, se puede ir mucho mas allá de estas indicaciones generales, y representar con corta diferencia, las inclinaciones en números, suponiendo en el centro de la tierra un iman muy pequeño, ó lo que es lo mismo, dos centros magnéticos infinitamente próximos, cuya accion se ejerza sobre todos los puntos de la superficie de la tierra, segun las leyes comunes de las fuerzas magnéticas, es decir, en razon inversa del cuadrado de la distancia. Este resultado se halla establecido con arreglo á la observacion en una memoria publicada por Mr. de Humboldt, sobre las variaciones del magnetismo terrestre á diferentes latitudes. Si se

refieren los puntos de la tierra por longitud y latitud al ecuador magnético, considerado como un círculo maximo del globo, el cálculo demuestra que respecto á todas las zonas en que puede admitirse esta circularidad, la tangente de la inclinacion es doble de la tangente de latitud magnética. (1) Pero por desgracia esta ley tan sencilla no se estiende sin modificacion ninguna á los puntos de la tierra que se resienten de la influencia que producen las inflexiones del ecuador magnético. Si se trata de aplicar la relacion de las tangentes á algunas islas australes del mar del sur, por ejemplo á Otaiti, donde Cook ha hecho tan frecuentes observaciones, se hallan inclinaciones australes mucho mas fuertes; y por el contrario, respecto á los paises situados al norte de la América á la misma longitud, las inclinaciones calculadas son mucho mas débiles. Estas diferencias resultan necesariamente de la inflexion que en esta parte del globo conduce el ecuador magnético hácia el polo austral, y presentan la mejor prueba de esta inflexion.

Para que se verifiquen estos fenómenos es necesario, pues, suponer hácia los archipiélagos del mar del sur alguna causa pertubatriz local, tal como un centro particular de fuerzas magnéticas que influya sobre todo en éste hemisferio, y modifique la accion central. En efecto, esta suposicion proporciona el medio de poner acordes todos los resultados, y no exige en el centro secundario sino una fuerza muy débil, cuya energía consista casi únicamente en la proximidad; mas antes de tratar de esplicarla y medirla, es

(1) Al principio no habia yo enunciado la relacion de la inclinacion con la latitud magnética bajo esta forma, sino bajo otra mas complicada. Mr. Kraft, examinando mis cálculos en las memorias de Petersburgo de 1809, ha tratado de ver si las observaciones consideradas empiricamente conducian á alguna otra ley mas sencilla, y ha hallado la que acabo de decir. En seguida ha visto que no era mas que una simple transformacion de la mia, y yo me he aprovechado de esta feliz observacion.

preciso estudiar las variaciones que sufren la declinacion de la brújula y la intensidad de las fuerzas magnéticas á diferentes latitudes; porque siendo estos fenómenos igualmente resultados de la accion magnética del globo, deben tomarse en consideracion cuando se la quiera representar completamente.

Del mismo modo que para estudiar las inclinaciones hemos empezado buscando la serie de puntos en que son nulas, para discutir los fenómenos que presenta la declinacion es necesario empezar fijando los puntos de la superficie del globo, en que es nula, y cuya serie forma lo que se llama *líneas sin declinacion.* (1) Estas líneas no siguen á los meridianos geográficos, sino antes bien son muy oblícuas á ellos, y presentan inflexiones muy irregulares. Segun las observaciones mas recientes, existe en la actualidad una línea sin declinacion en el occéano atlántico entre el antiguo y el nuevo mundo; corta el meridiano de París á una latitud austral como de 65°, y desde allí sube al noroeste hasta unos 35° de longitud, donde se halla á la altura de las costas del Paraguay; despues, haciéndose casi norte-sur, sigue las costas del Brasil, y va hasta la latitud de la Guayana, donde volviendo de repente al noroeste se dirige á los Estados-Unidos, y de allí á las demas partes septentrionales del continente de América, que atraviesa, siguiendo siempre la misma direccion.

La posicion de esta línea sobre el globo no es fija, á lo menos de siglo y medio á esta parte, que se ha adelantado considerablemente del este al oesté. En 1657 pasaba por Londres y en 1664 por París; así que, segun su posicion actual, ha recorrido sobre este paralelo un espacio de cerca de 80° de longitud en 150 años. En lo que no hay duda alguna es en que esta variacion no es uniforme, sino muy desigual en diferentes paralelos, pues en la Jamaica, por ejemplo, la declinacion no ha sufrido ningun

(1) Mr. Humboldt me ha proporcionado los elementos esenciales para esta discusion.

cambio sensible hace 140 años. Segun la lentitud actual de este movimiento, no parece seguro que sea constantemente progresivo, ni que deba continuarse en un sentido determinado; siendo estas, cosas, que solo el tiempo podrá dar á conocer.

Algunas observaciones exactísimas acerca de la inclinacion, hechas en Londres en diferentes épocas por Gilpins y Cavendish, han hecho ver que este elemento es tambien variable, aunque mucho menos que la declinacion. La inclinacion en Londres era en 1775 de 72° 30′, y en 1805 de 70° 21.′ Este resultado ha sido confirmado en Francia por las esperiencias de Mr. de Humboldt.

Hay otra línea sin declinacion casi opuesta á la anterior; la cual, dirijiéndose constantemente al noroeste, empieza en el grande occéano austral, corta la punta occidental de la Nueva-Holanda, atraviesa el mar de la India, entra en el continente de Asia por el cabo Comorin; y desde este, atravesando la Persia y la Siberia occidental, se eleva hacia la Laponia. Pero lo que es muy digno de notarse es que esta línea se divide en dos cerca del grande archipiélago de Asia, dando origen á otra rama, que dirigiéndose casi exactamente del sur al norte, pasa este archipiélago, atraviesa la China, y vuelve á salir á la parte oriental de la Siberia. Las dos ramas que componen esta línea, ó no se mueven, ó su movimiento es lentísimo, pues la declinacion no ha variado en la Nueva-Holanda hace 140 años.

Hállanse tambien indicios de una cuarta línea sin declinacion, observada por Cook en el mar del sur, hácia el punto de la mayor inflexion del ecuador magnético. Los navegantes no han seguido esta línea hácia el norte; pero es sumamente probable que continúe en esta direccion; porque segun una observacion exactísima de Mr. de Humboldt, puesto que á los dos lados de cada una de estas líneas la declinacion muda de signo haciéndose de oriental occidental, es preciso que en la vuelta entera

del globo sea por el número de líneas sin declinacion, para venir á parar en el mismo signo despues de todas las alternativas.

Determinada la direccion de las líneas sin declinacion, es necesario para fijar el otro límite de los fenómenos trazar la serie de puntos en que es mayor la declinacion; y al investigarlo se encuentran líneas tambien irregulares que se interponen entre las primeras. La mayor declinacion que se ha observado en el hemisferio austral lo ha sido por Cook á 60°, 49′ de latitud, y 93°, 45′ de longitud occidental contada desde el meridiano de Paris; esta declinacion era de 43°, 45′. El mismo Cook ha observado tambien la mayor en el hemisferio norte á 70°, 19′ de latitud, y 161°, 1′ de longitud oriental; la cual era de 36°, 19′ al este.

Despues de haber espuesto todo cuanto se sabe hasta ahora sobre la direccion de las fuerzas magnéticas en diferentes partes de la tierra, nos resta considerar su intensidad absoluta: la cual ha sido mucho menos estudiada que la inclinacion y declinacion, sin duda por ser mucho mas dificil de medir con exactitud. Respecto á esto, no conozco mas observaciones exactas que las hechas por Mr. de Humboldt en su gran viage, y las de Mr. de Rossel en la espedicion del almirante d'Entrecasteaux.

Las investigaciones de Mr. Humboldt sobre este punto presentan un fenómeno muy notable, á saber, el aumento general de intensidad, caminando del ecuador magnético hácia los polos.

En efecto, la misma brújula que al tiempo de salir Mr. de Humboldt daba en Paris 245 oscilaciones en 10 minutos, solo dió en el Perú 211; y constantemente ha variado de este modo, es decir, que el número de oscilaciones ha disminuido siempre al aproximarse al ecuador magnético, y ha aumentado al separarse de el hacia el norte. Estas diferencias no pueden atribuirse á una disminucion de las fuerzas magnéticas de la brújula, ni suponer que se debilita-

rian estas por efecto del tiempo y del calor; pues despues de haber permanecido tres años en los paises mas cálidos de la tierra, esta brújula ha dado en Méjico oscilaciones tan rápidas como en París. En fin, Mr. de Humboldt no ha olvidado nada en sus observaciones que pudiera contribuir á su exactitud, y se hallan confirmadas por los resultados que ha obtenido haciendo oscilar su aguja sucesivamente en el meridiano magnético y en el plano rectangular, porque la inclinacion, calculada sobre estos datos, se halla generalmente de acuerdo con la que ha obtenido por la esperiencia sola, aunque entonces no conocia la union de estos dos elementos, que ha indicado despues Mr. Laplace. No pudiéndose, pues, poner en duda la exactitud de estas observaciones, debe suponerse la misma verdad en la consecuencia que se deriva de ellas, á saber, el aumento de la fuerza magnética terrestre, yendo del ecuador magnético hácia los polos. Las esperiencias hechas por Mr. de Rossel en Brest y en la nueva Holanda conducen á la misma conclusion.

La esposicion que acabamos de hacer de nuestros conocimientos sobre el magnetismo del globo manifiesta cuán imperfectos son aun á causa de la ignorancia en que estamos de una multitud de datos esenciales, sobre todo con respecto á la declinacion; por lo que no debemos esperar poder subir á sus verdaderas causas. No nos queda, pues, otro recurso mas que el de buscar leyes empíricas, que abrazando el mayor número de hechos posible, hagan ver sus relaciones numéricas, é indiquen los elementos principales en que hay que recurrir á la observacion.

Hemos anunciado ya que una gran parte de las inclinaciones observadas, sobre todo en las partes del globo en que es circular el ecuador magnético, se pueden representar con bastante exactitud por la accion de dos centros magnéticos colocados junto al centro de la tierra á una distancia muy pequeña uno

de otro. MM. de Humboldt y Biot llegaron á este resultado, y su memoria se hallaba ya publicada cuando se supo que el célebre astrónomo Mayer habia llegado á la misma consecuencia, examinando las inclinaciones que se conocian en su tiempo, y que aun hizo uso de ella para representar las declinaciones en una memoria leida á la sociedad de Gotinga, pero que no se imprimió. Habiendo tenido despues la bondad el hijo de este grande astrónomo de enviar á Mr. Biot un estracto de ella, se convenció de esta identidad, asi como reconoció tambien que Mayer descubrió de un modo esperimental la ley de las atracciones magnéticas, recíproca al cuadrado de la distancia.

Esta consecuencia comun, deducida de elementos tan distintos, parece indicar alguna cosa mas que una ley puramente empírica, y por lo mismo es necesario examinarla mas detenidamente. Desde luego se ve que un solo iman colocado en el mismo centro de la tierra no puede producir estos fenómenos, pues entonces el ecuador magnético deberia ser un círculo máximo, perpendicular á la línea recta tirada por los dos centros de accion, y no resultaria la inflexion que hemos observado en el mar del sur. Por otra parte, un iman semejante, de cualquier modo que se le colocase daria necesariamente fenómenos simétricos á una y otra parte del plano que pasase por sus dos centros de accion y el de la tierra; simetría que no conviene con los hechos observados en el mar del sur y el continente de Asia.

No pudiendo, pues, adoptar esta idea sencilla, tratemos de separarnos de ella lo menos posible; y pues hemos visto que representa bastante bien las observaciones realizadas en Europa y el océano atlántico, tratemos de hacer en ella una modificacion tal, que sea poco sensible en esta parte del globo, y mucho en la parte opuesta en que el ecuador magnetico sufre de repente su inflexion.

Esto se conseguirá colocando cerca de este punto un segundo iman excéntrico, cuya posicion y energía relativa se determinarán de modo que satisfagan á las observaciones. Ahora bien, efectuando este cálculo se halla que basta dar á este iman una fuerza muy pequeña para hacer desaparecer las anomalías que se verifican en este punto del globo, y concertar las débiles inclinaciones que se observan en la parte austral del mar del sur con las grandes que se notan en el norte de América. Repartiendo de este modo otros varios centros secundarios en los puntos del globo en que las declinaciones parecen mas estrañas, es verosímil que se podrian representar todas con exactitud, lo mismo que las inclinaciones y las intensidades. Asi es como en el sistema del mundo el movimiento principal producido por la accion del sol se halla modificado por las perturbaciones que producen las masas de los planetas; pero de la misma forma que es preciso conocer el sitio de estas masas para poder calcular su influencia, se necesita tambien que observaciones mas exactas que las que se han hecho hasta aqui nos indiquen la posicion de los diferentes centros magnéticos secundarios antes que podamos pasar á calcular sus efectos.

La accion magnética central indicada por estos fenómenos con mucha verosimilitud, ¿es realmente producida por un nucleo magnético encerrado en lo interior del globo terrestre, ó no es mas que la resultante principal de todas las partículas magnéticas diseminadas en su sustancia? Lo ignoramos. Sin embargo, la última suposicion parece la mas verosímil; y en este caso los centros secundarios estarán determinados por algunas atracciones locales que lleguen á preponderar. En efecto, las observaciones manifiestan de un modo no dudoso que el sistema general de las declinaciones, inclinaciones é intensidades magnéticas, se halla modificado de una manera sensible, y á veces repentina y muy irregular por la inmediacion de las grandes cordilleras de montañas.

Esto parece que se confirma tambien por la singular inflexion que sufre el ecuador magnético hácia los numerosos archipiélagos del mar sur. En efecto, se sabe que las islas que se hallan en este mar no son sino las cimas de montañas altísimas que se elevan absolutamente en pico desde el seno de un océano donde no se halla fondo. Si las madreporas de que parecen compuestas no formasen sino una capa de poco grueso, y el resto de su masa se hubiese producido, como han pensado algunos naturalistas hábiles, por la accion de fuegos subterráneos, el sistema de estas islas formaria la cadena volcánica mas estensa que hay sobre la superficie del globo. Entonces todas las irregularidades producidas por este sistema en las leyes generales del magnetismo terrestre serian muy sencillas y conformes á las que se observan en los paises volcanizados; porque la accion de los fuegos subterráneos ha debido cambiar necesariamente el estado químico, y la colocacion natural de las partes ferruginosas en los sitios en que se ha verificado; cambios que no pueden realizarse sin que se altere la direccion de la aguja magnetizada, y se modifique en estos puntos la accion general del globo. Se pueden presentar muchos ejemplos de variaciones de esta especie ocasionadas repentinamente; y Mr. de Humboldt las ha observado en el Perú despues de un gran terremoto. Es, pues, muy posible que el centro magnético particular del mar del sur provenga de causas semejantes. Sin duda existen otras análogas en distintos paises; y ¿no serán tal vez sus variaciones las que de doscientos años acá han producido en las declinaciones de la brújula unas alteraciones tan estrañas é irregulares, que hasta ahora ha sido imposible hallar ninguna ley á que esten sujetas, y que por su misma irregularidad parecen anunciar que no son efecto de una causa uniforme y constante? Segun esta idea, nada escitaria en Europa la vuelta de la brújula hácia el este; y en efecto, desde que ha dejado de declinar al oeste no se ha visto que haya

retrogradado una cantidad sensible; de suerte que por las observaciones hechas hasta ahora es imposible decidir si cambiará.

La accion magnética del globo terrestre no se limita á su interior ó á su superficie, sino que se estiende al espacio como han comprobado Mr. Gay-Lusac y Biot en una ascension aerostática. Parece tambien, segun varias observaciones, que la intensidad de esta accion disminuye lentamente á medida que es mayor la distancia á la superficie de la tierra, pues no hemos hallado una disminucion sensible á la altura á que hemos subido. Probablemente esta disminucion seguirá la ley general de las atracciones magnéticas, es decir, la razon inversa del cuadrado de la distancia; y asi debe estenderse indefinidamente en el espacio. La analogía hace creer que la luna, el sol y los demas cuerpos celestes se hallan dotados de acciones semejantes, tanto mas, cuanto la composicion de las areolitas caidas sobre nuestro globo nos indica que los astros contienen sustancias magnéticas como el niquel y el hierro. Las acciones magnéticas de todos estos cuerpos deben, pues, influir segun sus posiciones y distancias sobre la direccion de la aguja magnetizada, asi como sobre la intensidad absoluta de la fuerza directriz; y como estas posiciones y estas distancias varían sin cesar por efecto del movimiento de la tierra y demas planetas, deben resultar perpetuas variaciones en las fuerzas magnéticas. Por ejemplo, si es sensible la accion magnética del sol y de la luna, el movimiento de rotacion de la tierra sobre su eje, y el de revolucion al rededor del sol, deben producir en la aguja magnetizada oscilaciones diurnas y anuales. Ahora bien, no solo tales movimientos existen, sino que sus períodos, comprobados por largas series de observaciones, estan en armonía con la causa que acabamos de indicar. En París, segun Mr. de Cassini, el maximum de declinacion diurna parece verificarse entre el medio dia y las tres de la

tarde; entonces la aguja se halla estacionaria; en seguida se acerca al meridiano terrestre hasta cosa de las ocho, se detiene y permanece estacionaria toda la noche; y al dia siguiente á cosa de las ocho de la mañana empieza de nuevo á separarse del meridiano terrestre. Si este segundo movimiento la separa de él mas que la víspera, la declinacion es creciente, y si sucede lo contrario decreciente. Las mayores variaciones diurnas se verifican generalmente en los meses de Abril, Mayo, Junio y Julio, es decir, entre los dos equinoccios de la primavera y del otoño, y son en París de 13′ á 16′; las mas pequeñas son de 8′ á 10′, y se verifican todo el resto del año. Ahora bien, si se comparan las posiciones análogas de la aguja en diferentes dias á las mismas horas para tener su marcha general, se ve que desde el equinoccio de la primavera hasta el solsticio de verano, la declinacion es decreciente, y creciente todo el resto del año, es decir, desde el solsticio de verano hasta el equinoccio de la primavera siguiente, que es lo que representa la fig. 38. El conocimiento de estos períodos se debe á Mr. de Cassini, que los ha establecido con arreglo á ocho años de observaciones hechas en el observatorio de París.

En fin, repetidas observaciones prueban tambien que la aguja magnetizada se halla sujeta á variaciones violentas y accidentales, que coinciden con las apariciones del meteoro luminoso llamado *aurora boreal.* Se ignora absolutamente la causa de esta correspondencia, asi como la de la misma aurora. La influencia de este meteoro sobre la aguja ordinariamente es pasagera; y en este caso, despues de haberse agitado vivamente mientras se manifiesta, vuelve á su posicion ordinaria, y toma de nuevo el órden de sus movimientos acostumbrados; pero algunas veces sucede tambien que sufre una dislocacion durable, pues Mr. de Cassini ha visto algunos ejemplos de esto.

Para medir las variaciones de la aguja, ya diur-

nas, ya anuales, se puede emplear el aparato de microscopio de Coulomb, ó el anteojo movible de Mr. de Prony, que se ha descrito en el capítulo tercero.

Seria muy conveniente para los futuros progresos de la física determinar con exactitud la intensidad actual del magnetismo terrestre, como se ha fijado el peso de la atmósfera y la temperatura actual de diferentes climas. Repitiendo la misma operacion dentro de algunos siglos se sabria si las fuerzas magnéticas varían en su energía, como se sabe que han variado en su direccion.

El primer medio que se ofrece es el de observar ahora la declinacion, inclinacion é intensidad por medio de tres agujas destinadas cada una á su uso, y conservarlas cuidadosamente, para probarlas de nuevo de siglo en siglo: y como en este intervalo podrian perder mucho de su magnetismo, se les volveria á comunicar hasta el mismo grado por medio de una nueva magnetizacion, valiéndose para ello de barras muy fuertes, combinadas segun el método del doble toque. En efecto, en la aplicacion de este método adquieren momentáneamente por la influencia de las barras estremas un grado de magnetismo mucho mas fuerte que el que pueden conservar quedando abandonadas á sí mismas; de suerte, que permaneciendo la misma su constitucion íntima, el grado de magnetizacion en que se fijan debe ser el mismo tambien, ó á lo menos no debe tener otra variacion que la que provenga de un cambio de intensidad en la fuerza magnética del globo. Este método podria aun hacerse mucho mas seguro conservando cierto número de agujas bien esperimentadas, cuyos efectos absolutos en una primera época se hubiesen determinado separadamente. Porque si esperimentándolas de nuevo en otra época diferente se hallase que habian conservado sus primeras relaciones, se podria inferir con seguridad que no se ha alterado su constitucion, y por consi-

guiente la observacion de sus energías absolutas haria conocer el estado real de la fuerza magnética.

Mas el uso de este método exije la conservacion de las agujas y la certeza de su identidad; cuidado que podria evitarse si se hallase el medio de construir en todo tiempo agujas perfectamente comparables. Para esto no se puede pensar en emplear el acero, que siendo una aligacion de carbon y de hierro, necesariamente es variable en sus proporciones; pero podria suplirse si se consiguiera obtener por medios químicos hilos de hierro dulce perfectamente puro. Segun las esperiencias de Coulomb, la torsion da al hierro un temple tal, que recibe el magnetismo casi tan bien como el acero, y le retiene con igual constancia; y por consiguiente solo se trataria entonces de regularizar la torsion; lo cual seria fácil, tomando hilos de una longitud y grueso determinados, y midiendo por medio de un micrómetro el número de vueltas que se les torcia. Se magnetizaria cada hilo de estos hasta la saturacion, y se juntarian en un número dado para formar hacecillos, cuya fuerza directriz se mediria, ya por medio de la balanza magnética, ya por el método de las oscilaciones. Toda la dificultad de la cuestion se halla, pues, reducida á obtener hierro perfectamente puro, y esta dificultad pertenece esclusivamente á la química.

LIBRO SESTO.

DE LA LUZ.

Consideraciones generales.

Cuando hallándose el sol oculto bajo el horizonte se eleva, y de repente aparece á nuestros ojos, se ve que existe entre este astro y nosotros cierta especie de comunicacion, que nos hace conocer su existencia sin necesidad de tocarle. Esta especie de comunicacion, ejercida á distancia y transmitida por los ojos, constituye lo que se llama *luz*. Los cuerpos que pueden escitarla inmediatamente, y manifestarnos asi su existencia, se llaman cuerpos *luminosos por sí mismos*; tales son el sol y las estrellas. Generalmente todas las sustancias materiales se hacen luminosas por sí mismas cuando se eleva bastante su temperatura, y al enfriarse pierden esta facultad. Sin embargo, aun despues de haberle perdido, si se hallan iluminadas por un cuerpo luminoso pueden enviarnos su luz como si les fuese propia, y entonces se hacen visibles *por reflexion*. De este modo percibimos los objetos que nos rodean mientras el sol se halla sobre el horizonte, y todo se oscurece y se hace invisible luego que se oculta este astro.

Siempre que un objeto nos comunica la sensacion de su existencia por medio de la luz, esta transmision se verifica en línea recta; pues si se colocan hilos de seda ó metal muy finos paralelamente unos á otros y en un mismo plano, un punto luminoso, colocado en la prolongacion de esta direccion, mas allá de los hilos, queda enteramente eclipsado; mas por poco que se le separe de ella, trans-

mite inmediatamente la luz. Del mismo modo, si se toman dos planos de metal bien derechos, y se aproximan uno á otro paralelamente, mirando la luz del cielo por el espacio que los separa, se verá siempre por pequeña que sea la distancia que haya entre los planos, hasta que lleguen á tocarse; pero con que uno de ellos sea un poco convexo y el otro un poco cóncavo, la luz deja de verse antes del contacto. Una multitud de esperiencias diarias confirman esta verdad, que siendo de un uso contínuo debemos enunciarla de una manera sencilla. Para ello se designa con una denominacion particular cada línea recta, tirada de un punto cualquiera de un cuerpo luminoso al ojo, llamándola *rayo luminoso de luz*, y se concibe que la vision directa se verifica por medio de estos rayos. Esta abstraccion puede emplearse tambien en un sentido fisico, para distinguir las partes componentes de un hacecillo de rayos luminosos, á lo menos hasta los últimos límites de division á que pueden llegar nuestros sentidos; pues por fino que sea un rayo de luz, en tanto que es sensible á nuestros órganos, se encuentran en él idénticamente las mismas propiedades que en los manojos mas voluminosos.

Las observaciones astronómicas demuestran que la comunicacion establecida por la luz entre nosotros y los cuerpos luminosos no es instantánea. Nosotros no percibimos la sensacion de la presencia del sol en un punto cualquiera de su órbita, hasta 8′, 13″ despues que ha llegado á dicho punto. Cuando los satélites de Júpiter, que son otras tantas lunitas alumbradas por el sol, se eclipsan detras del cuerpo de su planeta, y en seguida se separan de su sombra, pasa siempre algun tiempo desde el instante fisicó de su separacion hasta aquel en que empezamos á percibirlos. Este retardo es mas ó menos largo, segun se halla la tierra mas ó menos distante de Júpiter, y es exactamente proporcional á la distancia; de donde se ha inferido que la velocidad de la comunicacion

de la luz es absolutamente uniforme en toda la estension del orbe terrestre, y aun del orbe de Júpiter.

De este fenómeno resulta tambien que en el instante mismo en que los satélites de Júpiter entran en la sombra de este planeta, los vemos aun fuera de ella; pues la sensacion que entonces tenemos proviene de su presencia en el punto de su órbita que ocupaban algunos momentos antes; y por consiguiente en el momento en que se nos figura que desaparecen, hace ya algun tiempo que en realidad han desaparecido. Asi, la comunicacion que resulta de su presencia en un punto, continúa propagándose y transmitiéndose aun despues que se han separado de él; es preciso, pues, que esta comunicacion se verifique, ó por pulsaciones atravesando un fluido elástico que las transmita desde los cuerpos luminosos hasta nosotros, como se transmite el sonido en el aire, ó por una emanacion real de átomos materiales arrojados por los cuerpos luminosos. En cualquiera de estos casos, puesto que la sensacion se verifica aun atravesando la masa de ciertos cuerpos que se llaman *transparentes* ó *diáfanos*, siempre será indispensable, ó que las pulsaciones del fluido elástico continúen propagándose por los poros de estas sustancias, ó que los átomos luminosos continúen moviéndose en dichos poros para poder atravesar aquellas sustancias.

Cada opinion tiene sus partidarios: los que se inclinan á la idea de un fluido elástico, alegan la facilidad que presenta este sistema para la transmision rápida y uniforme; mirando como improbable la emanacion real de átomos dotados de una velocidad tal como la que deberian tener las moléculas de la luz, debiendo ser al mismo tiempo tan sutiles, que pudiesen atravesar con facilidad los cuerpos transparentes. Los fenómenos son los que nos deben instruir en este punto, pues nada hay en si mismo lento ó rápido, asi como nada hay grande ni pequeño. La velocidad de una bala de cañon nos parece tan

rápida, que no pueden seguirla nuestros ojos, y sin embargo es muy lenta respecto á la velocidad de rotacion de la tierra; esta á su vez, lo es, comparada con la del movimiento aunal; y por último, esta es mucho menor que la velocidad de transmision de la luz. Sin duda alguna nos es mas dificil comunicar á un cuerpo cualquiera una gran velocidad que una pequeña, porque nuestras fuerzas son limitadas; pero ¿qué comparacion puede haber entre esta limitacion y la estension de las fuerzas que obran en la naturaleza? Ninguna, absolutamente ninguna. Ahora bien, prescindiendo de esta preocupacion, y consultando simplemente los fenómenos, se ve que todos se verifican de un modo exactamente conforme á la idea de las emanaciones. Cuando la luz atraviesa los cuerpos diáfanos, su marcha es exactamente la que deberia ser si estuviese compuesta de átomos capaces de ser atraidos por las moléculas del cuerpo. Si se observan sus movimientos en sustancias gaseosas ó líquidas de diferente naturaleza, y se mezclan en seguida estas sustancias, suponiéndolas tales, que no ejerzan unas sobre otras ninguna accion química, puede calcularse el movimiento que hará la luz atravesando la mezcla, segun las leyes de las atracciones de las sustancias componentes anteriormente conocidas, y el resultado de este cálculo se halla exactamente conforme con la observacion. ¿Quién puede esplicar cómo se compondrian entonces las ondulaciones? ¿Y aun sin poderlo esplicar, quién no ve que se compondrian con arreglo á las leyes escesivamente complicadas? En fin, otros fenómenos manifiestan que los rayos luminosos pueden modificarse y prepararse de modo que sus diferentes lados presenten diversas propiedades físicas; lo cual puede convenir muy bien á una serie de partículas, pero de ningun modo á una serie de pulsaciones; y aun por el desarrollo de estas propiedades se han llegado á reconocer otras modificaciones, tales como

las que resultarian de los movimientos de estas partículas al rededor de su centro de gravedad. El conjunto de estos fenómenos parece, pues, poner hoy fuera de toda duda el sistema de emanacion, si se puede llamar sistema lo que es una consecuencia tan natural de los hechos, y lo que puede reproducirlos con tanta facilidad y exactitud.

Hasta aqui hemos considerado la visiòn como propagada desde el objeto al ojo; mas no es eǹ la superficie esterior de este órgano donde se verifica la sensacion, sino en su interior, y segun se cree sobre una membrana nerviosa que se halla en su fondo, llamada retina. En efecto, cuando á consecuencia de alguna enfermedad llegan á endurecerse ó alterarse los diferentes líquidos que componeǹ el resto del órgano, de modo que la luz no pueda llegar á la retina, se pierde la facultad de ver, y vuelve á recobrarse luego que se quitan las partes del ojo que han perdido su transparencia. Cada parte de estas puede estraerse separadamente sin destruir totalmente la sensacion de la vista; pero al momento queda destruida si se altera la retina. Se sabe ademas que á esta membrana vienen á parar dos grandes nervios que parten del cerebro, y que se ensanchan sobre su parte posterior, ramificándose de mil maneras; ó para decirlo mejor, la retina no es otra cosa sino la estension y dilatacion de estos nervios. Ahora bien, como se sabe que en todos los demas órganos la sensacion se produce por medio de los nervios, esta analogía confirma la idea de que la sensacion de la vista debe hacerse en la retina, ya por las ondulaciones propagadas del fluido elástico, ya por la impresion directa de los átomos luminosos, si como creemos, la luz es una materia. Cuando hayamos estudiado los instrumentos de óptica entraremos en la esplicacion mas detallada de la construccion interior del ojo; porque este no es en realidad mas que un instrumento de óptica, pero tan perfecto y tan admirable, que la

teoría mas profunda no es capaz de apreciar lo que tiene de maravilloso, y el arte no puede imitarle. Hasta entonces nos bastarán estas nociones preliminares, limitándonos á considerar el fondo del ojo como el centro del órgano en que se hace la vision.

Cuando miramos un objeto de un tamaño sensible, los rayos que salen de sus estremos opuestos llevan al ojo en diferentes direcciones, y por consiguiente se cruzan bajo cierto ángulo en el punto de su incidencia delante de la pupila. Este ángulo se llama *ángulo visual* ó *diámetro aparente* de los objetos; porque en efecto juzgamos del tamaño absoluto de estos por el ángulo visual con que llegan á nuestro ojo, combinado con la idea de la distancia á que los suponemos colocados.

Cuando la luz se propaga de un cuerpo luminoso hácia nuestros ojos, llega siempre atravesando diferentes medios, como el aire, el agua ú otros cuerpos diáfanos que la permitan pasar. Los rayos al entrar en estos medios siguen á veces su camino en línea recta; pero comunmente se separan de ella; y este fenómeno se llama *refraccion*. Ademas, la luz no nos llega directamente, sino que muchas veces encuentra superficies lisas que nos la envian, la *reflejan*, y nos hacen ver los objetos por este medio indirecto, cuando nuestro ojo se halla en la direccion que siguen los rayos asi reflejados. La refraccion y la reflexion de la luz van, pues, á ocuparnos sucesivamente. Parece que en este caso deberiamos empezar por el primero de estos dos fenómenos, puesto que hallándonos sumerjidos en un fluido material, como es el aire, la vision no puede verificarse sin que este obre sobre los rayos luminosos; pero como su accion es muy débil, y apenas los separa de su direccion natural, prescindiremos de ella al principio, y empezaremos estudiando las leyes del fenómeno de la reflexion, que son tambien mucho mas sencillas. Su conjunto constituye el primer ramo de la óptica, llamado *catóptrica*.

CATÓPTRICA.

CAPITULO PRIMERO.

Leyes generales de la reflexion de la luz.

Para que la superficie de un cuerpo refleje la luz de un modo regular, y dé una imágen clara de los puntos luminosos que la iluminan, es necesario pulimentarla, es decir, desgastar cuidadosamente cuanto sea posible todas sus pequeñas desigualdades. Tal es el estado á que conduce el arte al vidrio, los cristales y los metales. Primeramente consideraremos los fenómenos que presentan las superficies asi preparadas, y despues trataremos de examinar en qué contribuye á su efecto el pulimento.

Para estudiar con método las leyes de la reflexion empezaremos determinándolas con respecto á las superficies planas, y en seguida nos será fácil estenderlas á las curvas; porque en todas las modificaciones que podemos dar á la luz haciendo obrar sobre ella cuerpos de una estension sensible, los rayos luminosos obran, á lo menos respecto á nuestros sentidos, exactamente como si fuesen líneas rectas matemáticas; de suerte que la reflexion en cada punto de una superficie se verifica enteramente lo mismo que sobre el plano que la tocase en este punto, y como se puede calcular siempre la posicion del plano tangente, respecto á todos los puntos de una superficie dada, se sigue que la reflexion de la luz sobre cualesquiera superficie será solo un objeto de cálculo, luego que se conozca el modo con que se verifica en las superficies planas.

Para hacer esta investigacion, y en general para todas las esperiencias de óptica, es indispensable poder trabajar en un cuarto que reciba, á lo menos una parte del dia, los rayos del sol, y cuyas ventanas puedan cerrarse con sus puertas tan exactamente, que se pueda producir una completa os-

curidad. Se hace en estas puertas una abertura mas ó menos ancha, y se adapta á ella una lámina metálica con varios agujeros de diferentes diámetros, que puedan abrirse ó cerrarse cuando se quiera. Abriendo uno solo de estos agujeros, cuando el sol ilumina aquella ventana, la luz de este astro entrará en el cuarto bajo la forma de un rayo muy sutil, que se hará visible por la iluminacion de los polvitos que se hallan siempre suspensos en el aire. Mas adelante haremos conocer otros aparatos mas sabios y mas cómodos; pero este nos bastará por ahora. En este caso, si este rayo de luz solar se hace caer sobre la primera superficie de una lámina de vidrio horizontal, bruñida, transparente y oblícua á su direccion, se observan los fenómenos siguientes:

1.º El rayo luminoso no se transmite enteramente atravesando la superficie, sino que una parte es reflejada hácia arriba en una direccion que depende de su oblicuidad. Si se coloca el ojo en esta direccion, se ve una imágen del sol viva y brillante, que parece venir de debajo del vidrio, del lado del suelo.

2.º El punto en que el rayo encuentra á la lámina bruñida es visible de todos los puntos del cuarto, ademas de la direccion del rayo reflejo; pero parece incomparablemente menos luminoso que mirándole en esta direccion, que es la única que presenta una imágen regular del sol.

3.º Una parte de la luz incidente evita la reflexion en la primera superficie de la lámina, y penetra en su interior. Luego que llega á la segunda superficie sufre aun otra reflexion parcial, y el resto sale al aire por debajo del vidrio.

Limitándonos, pues, á los fenómenos que presenta la primera superficie, vemos que en ella se verifican tres operaciones distintas. Una parte de la luz incidente se refleja de un modo regular y siguiendo una direccion determinada: otra porcion se

refleja indiferentemente hácia todas partes, y se disemina como si el cuerpo no estuviese pulimentado; y en fin, el resto pasa sin reflejarse.

Si á la lámina de vidrio se sustituye un plano metálico bruñido, se verificarán los dos primeros fenómenos, pero no el tercero. Asi, el metal bruñido refleja regularmente una parte de la luz incidente, disemina otra parte de un modo irregular, y absorve el resto; cuyo resto es análogo á la parte que sale del cuerpo transparente.

Ahora bien, dada la direccion del rayo luminoso con respecto á la superficie reflejante, tratemos de examinar cuál es la direccion que sigue la parte de luz que se refleja con regularidad; lo que conseguiremos por medio del aparato representado, fig. 1. Este instrumento, que igualmente nos servirá para otros muchos usos, ha sido inventado por Mr. Cauchoix. Compónese de un plano circular AZB, colocado verticalmente sobre un pie sólido; la circunferencia A 2 B está graduada, y tiene dos correderas metálicas S O concéntricas con ella, cada una de las cuales tiene un agujerito hecho á igual distancia del plano del círculo. Delante del centro C se coloca un espejo bruñido G G, que se puede nivelar por medio de tornillos, de modo que quede perpendicular al plano; lo cual puede comprobarse colocando un nivel sobre la superficie superior del espejo, y viendo si permanece inmóvil cuando el plano del círculo está dirijido sobre algun objeto perfectamente vertical. En fin, sobre este espejo y enfrente del centro del círculo se fija una lámina metálica plana, cuyo borde rectilíneo CL afilado figura una línea recta que parte del centro C perpendicular al plano del círculo; y sobre esta línea se hace una señal C′ á la misma distancia que los agujeros de las correderas, de modo que los tres puntos S O C′ se hallen siempre en un mismo plano paralelo al círculo graduado. Dispuesto todo de este modo, se coloca el instrumento delante de la ventana abierta, de suerte

que la luz del sol pueda entrar por el agujero S, y llegar al espejo bajo diferentes ángulos; despues se mueve la corredera O, hasta tanto que mirando por ella se perciba la imágen del agujero S, exactamente en el borde CL de la lámina central. La esperiencia hace ver que esta condicion puede verificarse siempre; y que cuando se verifica, el punto de incidencia cae exactamente sobre la señal C′; luego *el rayo incidente y el reflejo se hallan comprendidos en un mismo plano perpendicular á la superficie reflejante.* Esta es la primera ley fundamental de la reflexion. Ademas, reuniéndose estos dos rayos en el eje CC′ del círculo dividido, sus inclinaciones sobre la superficie del espejo se miden por los arcos BS AO, y se pueden contar en la division, partiendo del diámetro horizontal AB. Haciendo esta observacion en todas las posiciones posibles de las correderas, se halla que siempre *el rayo incidente y el reflejo forman ángulos iguales con la superficie reflejante.* Esta es la segunda ley general de la reflexion; y reunida á la anterior determina completamente todas las circunstancias de este fenómeno.

Concibamos que por el punto de incidencia C pasa una línea CZ, normal á la superficie reflejante; el ángulo SC2, formado por el rayo incidente SC con esta normal se llama *ángulo de incidencia*, ó simplemente *incidencia*; y OE2 se llama *ángulo de reflexion.* Esto supuesto, la segunda ley general de la reflexion que se deduce de las observaciones anteriores, es, que *el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexion.*

CAPITULO II.

Del espejo plano.

Conocidas ya las leyes de la reflexion, podemos deducir de ellas todas las apariencias que deben ob-

servarse cuando es plana la superficie reflejante.

Sea S, fig. 2, un punto radiante, O el ojo, y AB el plano reflejante que supondremos indefinido. Entre todos los rayos luminosos que parten de S habrá uno, por ejemplo S I, que despues de reflejar sobre el espejo, irá á parar al ojo O en la direccion I O, y en este caso los ángulos SIA, OIB serán iguales entre sí. La necesidad de esta condicion basta para determinarle, y he aqui una regla que demuestra la geometría. Bájese del punto radiante S una perpendicular SA que encuentre en A á la superficie reflejante; prolónguese esta perpendicular al otro lado del espejo una parte AD igual á SA; tírese desde el punto D al ojo la línea DO; esta será la direccion del rayo reflejo, y el punto I en que corte la superficie del espejo, será el punto de incidencia. Ademas, si el punto luminoso y el ojo se consideran como puntos matemáticos, el rayo determinado de este modo es el único que puede reflejarse hácia el ojo.

Pero la abertura de la pupila por donde entran al ojo los rayos luminosos no es un punto matemático, sino un espacio que tiene en el hombre cerca de dos milímetros de diámetro, y que podemos representar por LL, fig. 3. Todos los rayos reflejos que puedan entrar por esta abertura llegarán hasta la retina, y contribuirán á la vision. Cada uno de ellos se determinan por medio de la misma construccion que acabamos de emplear, y por lo mismo es evidente que formarán un cono de base circular, cuyo cúspide será D y la base LL. Es un hecho; que cuando el ojo puede apreciar libremente la distancia de los puntos luminosos, los supone colocados en el punto en que empiezan á separarse los rayos pue le envian; y asi estando colocado el ojo en O, el punto luminoso, visto por reflexion, aparecerá en D, es decir, á igual distancia detras del espejo, de la que se halla en realidad delante de él.

Si el objeto radiante tiene cierta estension, cada

uno de los puntos que le componen formará su imágen separadamente, segun las leyes que acabamos de esplicar, y el conjunto de estas imágenes compondrá la del objeto. Supongamos que este sea una flecha SS′, fig. 4; la base S′ de la flecha formará su imágen en D y la punta S en D, formando las suyas los puntos intermedios en la recta DD′; asi la imágen entera se hallará comprendida entre los rayos reflejos estremos DO, D′O, y su tamaño absoluto DD′, será igual á SS′, es decir, al que realmente tiene el objeto.

Segun lo que acabamos de decir respecto á la fig. 3, el ojo supone cada punto de esta imágen en el sitio en que resulta de nuestra construccion geométrica. Luego si en su lugar se sustituyese un objeto real y semejante, es decir, una flecha enteramente igual á SS′, colocando su punta en D y su base en D′, mirándola desde el punto O, y suprimiendo el espejo se la veria exactamente lo mismo que se ve la imágen DD′ con el mismo tamaño, los mismos ángulos visuales y el mismo grado de claridad, puesto que todos los puntos luminosos que compusiesen el objeto real enviarian al ojo conos de rayos de luz exactamente semejantes á los que envia la imágen. Síguese de aqui que los objetos se ven en el espejo plano con las mismas formas, la misma claridad, y á la misma distancia, que si se viesen en el aire, con tal que solo se hallasen iluminados por la parte de luz refleja que compone la imágen, pues es preciso prescindir de la que se transmite si el cuerpo es transparente, ó de la que se absorve si es opaco.

Lo que hemos dicho basta para resolver todas las cuestiones que pueden proponerse relativamente á la reflexion de la luz y á la vista de los objetos en espejos planos.

Verificándose la reflexion de la luz con un rigor matemático, segun la ley que acabamos de demostrar, se puede hacer uso de ella muy útilmente pa-

ra medir los ángulos formados por dos superficies planas y bruñidas; y como esta medida es necesaria en una infinidad de esperiencias de física, y todos los demas medios que pueden usarse para obtenerla son demasiadamente groseros comparados con la reflexion de la luz, vamos á presentar algunos ejemplos sencillos de este método.

Cuando se trata de cuerpos cuyas superficies tienen alguna estension, por ejemplo, de prismas tallados y bruñidos artificialmente, como los que sirven en las esperiencias físicas, se puede usar el instrumento que nos ha servido para reconocer las leyes de la reflexion, fig. 1. Para esto, en vez de poner el espejo GG en contacto con la arista CL, se coloca á una distancia de dos ó tres milímetros, pero cuidando siempre de que quede perpendicular al plano del círculo, lo cual es fácil por medio de los tornillos que le hacen mover. Si se quiere conseguir cómodamente esta condicion, sin otro socorro que el instrumento mismo, se colocará la corredera O, figura 5; poco mas ó menos en el punto mas elevado del círculo; y colocando detras de ella el ojo se mirará al espejo, disponiendo este de modo que la imágen refleja del agujero O′ y del ojo venga á pasar por este mismo agujero, rasando el punto fijo C′ marcado en la arista CL. Luego que esto se verifique, es evidente que el rayo O′C′, que es paralelo al círculo, es perpendicular al espejo, y recíprocamente este se halla perpendicular al plano del círculo. Hecha esta comprobacion se colocará sobre el espejo una de las superficies del prisma cuyo ángulo se quiere medir; poniendo la arista del prisma bajo la arista CL, fig. 6, y disponiéndole de modo que su superficie superior sea perpendicular al plano del círculo: lo cual se verificará cuando colocando la corredera S en un punto cualquiera de la circunferencia, su imágen reflejada sobre esta superficie pueda verse desde la otra corredera en coincidencia con la señal fija C.′ Sea O la posicion de

la segunda corredera en este caso, siendo S la de la primera: entonces el punto N medio del arco OS indicará la direccion de la normal tirada á la superficie reflejante del prisma; y como CZ es la normal de la otra superficie, el ángulo ZCN, medido por el arco ZN, es el que comprenden las dos superficies, y se trataba de determinar. Esta ingeniosa disposicion, inventada por Mr. Cauchoix es rápida en su uso, y muy exacta en sus resultados.

El mismo principio aplicado de diversos modos ha hecho inventar otros muchos instrumentos análogos, á que se ha dado el nombre de *gonómetros*, esto es, medidores de ángulos; los cuales se comprenderán muy fácilmente con lo que hemos dicho; porque los medios de observacion y comprobacion son en el fondo los mismos que acabamos de ver. Sin embargo, no puedo menos de describir aqui el que ha inventado Mr. Wollaston, porque es aplicable especialmente á la mineralogia.

Este instrumento, fig. 7, se compone de un círculo vertical de cobre, graduado, que gira al rededor de un eje horizontal AA, colocado sobre un pie vertical CP. El eje AA está horadado en toda su longitud, para dejar paso á otro eje interior *a a*; en cuyo estremo saliente hay varias piezas que tienen movimientos rectangulares, y en las cuales se fija el cristal, cuyos ángulos quieren medirse. Para hacer uso de este instrumento es necesario colocarse enfrente de un edificio que presente muchas líneas horizontales paralelas unas á otras; se coloca su base sobre un plano horizontal, de modo que quede su limbo vertical, y perpendicular ó casi perpendicular á las líneas que deben servir de mira. Despues, colocando el ojo muy cerca del cristal, y mirando el edificio por reflexion sobre una de sus caras, se vuelve esta de modo que una de las líneas horizontales mas altas, vista de esta manera, coincida con una de las bajas, vista directamente. Luego diremos cómo se puede obtener esta coincidencia. Hácese

entonces girar de nuevo el eje interior *aa*, hasta tanto que se observe la misma coincidencia sobre la otra superficie cuyo ángulo con la primera se quiere medir. Cuando se ha obtenido sucesivamente esta coincidencia sobre las dos superficies sin variar el sitio del ojo, ni tocar al cristal sino por sola la rotacion del eje *aa*, se sabe que la interseccion de las dos superficies está exactamente horizontal, y por consiguiente paralela al eje *aa*. En este caso no se toca ya mas al cristal sino partiendo de una de las posiciones en que se observa la reflexion sobre una superficie, se hace girar el limbo hasta tanto que se observen igualmente la reflexion y la coincidencia sobre la otra. Este movimiento se verifica por medio del gran eje AA, que lleva consigo al interior *aa* al cristal y al limbo. El arco que este ha descrito, medido por la division trazada, es evidentemente igual al suplemento del ángulo formado por las dos superficies; pero la division trazada sobre el limbo está numerada de modo que indica el mismo ángulo, cuando se ha puesto el índice al principio sobre el punto O.

Para que la aplicacion de este método sea fácil y segura, es necesario que las dimensiones del cristal y su distancia al ojo puedan considerarse como infinitamente pequeñas en comparacion de la distancia á los objetos que sirven de mira; porque verificándose esto, la permanencia del ojo en un punto fijo no es necesaria, como no lo es en las observaciones que se hacen en el mar con los instrumentos de reflexion. Asi, colocando el ojo muy cerca del cristal, la aproximacion de las líneas de mira podrá ser indefinida en cierto modo. Se podrá, pues, limitar la precaucion, como ha hecho Mr. Wollaston, á colocarse en un cuarto á alguna distancia de una reja, cuyos hierros horizontales sirvan de mira, y la posicion vertical del instrumento podrá arreglarse por los largueros de la ventana. Entonces, para colocar la primera superficie del

cristal perpendicular al limbo, se colocará primeramente la cola *to*, fig. 8, paralelamente á la superficie de este; despues sin sacarla de esta direccion se la hará girar sobre su eje, hasta tanto que la imágen refleja de uno de los hierros se halle paralela á la imágen directa, y se la pueda hacer coincidir con ella por medio del eje *a a*. Hecho esto, se examinará si se verifica la misma condicion en la otra superficie del cristal; y como generalmente no sucederá asi, se conseguirá haciendo girar el brazo *bc* al rededor del punto *c* sin tocar á la varilla *to*; siendo este movimiento perpendicular al plano del limbo no deberá alterar la perpendicularidad de la primera superficie; pero para mayor seguridad se hará girar de nuevo el eje *a a* para conducirle á la coincidencia; y si hubiese sufrido alguna alteracion, se correjirá por el movimiento de rotacion de la varilla *to* sobre sí misma. Despues de una ó dos comprobaciones de este género, las coincidencias sobre ambas superficies se verificarán exactamente, y podrá observarse el ángulo que estas forman. Una de las ventajas peculiares de este gonómetro es la de poderle usar para medir los ángulos de los fragmentos mas pequeños de los cristales, á solos los cuales es aplicable exactamente; lo que es tanto mas ventajoso, cuanto que los cristales muy pequeños parece ser los únicos en que debe buscarse una perfecta regularidad.

CAPITULO III.

De los espejos curvos.

Para descubrir y determinar en general el sitio aparente, la forma y el tamaño de las imágenes que reflejan los espejos curvos, cualquiera que sea su figura, basta concebir la reflexion de cada rayo luminoso, como si se verificase en el plano tangente á aquella superficie en el punto de incidencia. Asi

se pueden estender por medio del cálculo á todas las superficies los resultados que hemos obtenido respecto á los espejos planos. Pero en los usos prácticos es inútil elevarse á esta generalidad, pues nunca se emplean sino espejos esféricos, cóncavos ó convexos, únicos que se pueden trabajar y bruñir con exactitud. Aun con estos no se obtienen imágenes claras, sino en el caso en que los rayos luminosos caen casi perpendicularmente á su superficie; y por tanto este será el único caso que deberemos examinar.

Para fijar con exactitud sus circunstancias concibamos en el espacio un punto luminoso que dirija sus rayos sobre las diferentes partes de una superficie esférica, cóncava ó convexa; y eligiendo uno tratemos de determinar el rayo reflejo que resultará de él. Para esto tendremos presente que la reflexion se verifica siempre por el plano que pasa por el punto luminoso y por la normal al punto de incidencia, y como aqui esta normal es el radio de la esfera, se sigue que la reflexion se hará por el círculo máximo que pase por el punto de incidencia y el punto luminoso.

Sea M A M′, fig. 9, la interseccion del espejo por este plano; coloquemos en S el punto luminoso, y designemos por S I el rayo incidente que hemos elegido en particular: desde el punto I tiremos al centro de la esfera la normal I C; y tomando el ángulo C I R igual á C I S, I R será la direccion del rayo reflejo.

Puesto que aqui queremos limitarnos á las incidencias casi perpendiculares, es preciso que los ángulos C I R, C I S sean muy pequeños, aun respecto á los rayos incidentes que se dirijan cerca de los bordes del espejo. Esto exige dos cosas: 1°. que la superficie del espejo no comprenda sino un corto número de grados de la esfera á que pertenece; y 2.° que el rayo incidente S A, tirado del punto radiante S al centro de figura A del espejo, haga un ángu-

lo muy pequeño con la normal central AC que se llama eje del espejo.

Suponiendo que estan satisfechas estas dos condiciones, si se repite respecto á todos los rayos incidentes emanados de S, la construccion que acabamos de aplicar á S I, se halla, tanto por el cálculo como por la construccion gráfica, que los rayos reflejos van á pasar muy cerca unos de otros en un pequeño espacio *f* que se puede considerar en cierto modo como un punto; de suerte que si se halla delante del espejo, debe formarse en él una concentracion de luz que produzca una imágen del punto S. En efecto, asi lo confirma la esperiencia, como veremos muy pronto; pero antes es necesario saber dónde deberá hallarse colocado este *foco*, respecto á cada posicion dada del punto luminoso.

Para esto, empecemos considerando el caso en que este punto se halle situado en la prolongacion del eje central A C, á una distancia tan grande, que todos los rayos que emanan de él puedan considerarse como paralelos á este eje, en la corta estension que comprende el espejo, fig. 10 y 11. En este caso se halla que el foco F situado exactamente en medio del radio de curvatura A C del espejo, á igual distancia de la superficie y del centro; el intervalo AF terminado de este modo se llama *distancia principal focal* del espejo, y el punto F, *foco principal.* Cuando el espejo es cóncavo hácia la punta radiante, fig. 10, el foco principal está situado al lado de este punto delante del espejo, y se verifica en él una concentracion real de luz: pero si el espejo es convexo, fig. 11, el foco principal cae mas allá de su superficie, los rayos reflejos no pueden atravesar el espejo para llegar á él, y asi el foco F no indica entonces mas que el punto del concurso ideal de sus prolongaciones.

Resuelto este caso de un modo general, nada es mas fácil que hallar el sitio del foco en todas las demas posiciones en que puede hallarse colocado el

punto radiante. En efecto, sea S, fig. 12 y 13 este punto, y entre todos los rayos que emanan de él tiremos uno S I paralelo al eje C A del espejo; de suerte que su rayo reflejo sera I F. Tiremos ahora S A dirijido al centro de la figura del espejo; S A se reflejará evidentemente al otro lado del eje C A, formando con él un ángulo igual, de modo que el rayo reflejo será A *f*. Prolonguemos I F, y A *f* hasta que se corten; el punto *f* será su foco, y el de todos los demas rayos que emanen del punto S. Esta constuccion traducida al lenguaje analítico, da una fórmula general que determina todos los valores sucesivos de las distancias focales relativas á todas las curvaturas posibles del espejo, y á todas las distancias de los puntos radiantes á su superficie. De aqui se puede deducir fácilmente el sitio, posicion y forma de las imágenes producidas por un objeto de una estension sensible; porque cada punto del objeto envia al espejo un cono de rayos luminosos, que tiene su foco en el sitio prescrito por la fórmula, y el conjunto de todos estos focos forman la imágen del objeto.

Para comprobar estas indicaciones con la esperiencia, es necesario elegir para objeto un cuerpo de pequeñas dimensiones, á fin de que aproximándole aun bastante cerca del espejo, las inclinaciones de los rayos que salgan de él no se separen de los límites que suponen nuestras aproximaciones. Es necesario tambien que este objeto pequeño sea muy luminoso, y de una forma tal, que se pueda reconocer fácilmente si su imágen está recta ó inversa; y nada hay que satisfaga mejor á todas estas condiciones que la llama de una bugía, colocada poco mas ó menos sobre el eje del espejo, y presentada sucesivamente á diferentes distancias de la superficie de este.

Empecemos suponiendo el espejo cóncavo, fig. 14, y coloquemos la bugía S S′ á una distancia bastante considerable con relacion al diámetro de su concavidad; entonces, pudiéndose considerar los rayos inci-

dentes como sensiblemente paralelos, la imágen ff' se formará con corta diferencia en el foco principal del espejo, á la mitad entre el centro de curvatura y la superficie. Para hacer sensible este fenómeno es necesario no colocar la llama exactamente en el eje, sino un poco á la derecha ó á la izquierda, fig. 15, á fin de que la imágen se forme al lado opuesto del eje. Entonces, colocando en el foco un vidrio esmerilado, y mirando por detras, se ve en efecto pintarse en él una imágen pequeña de la bugía, muy luminosa é invertida; circunstancia que el cálculo y la construccion gráfica indican igualmente, como una consecuencia de la reflexion de los rayos en la posicion que hemos supuesto al objeto. Tambien se puede suprimir el vidrio esmerilado, y mirar la imágen con la simple vista, colocándose en la prolongacion de los rayos que emanan de ella á la misma distancia que seria preciso colocarse para ver distintamente un objeto real. Hecha esta observacion, si se acerca poco á poco el objeto al espejo, aumenta la distancia focal, la imágen se aproxima al centro de curvatura y va aumentando aunque siempre invertida, y cuando el objeto llega á él, la imágen se le une, y coincide con el centro de curvatura en todas sus partes. Si el objeto continúa aproximándose al espejo, la imágen sigue separándose y aumentando; mas siempre conserva su inversion, como puede comprobarse, mirándola como antes á la simple vista, ó por medio del vidrio esmerilado. Estas apariencias continúan asi hasta que el objeto llega al foco principal F, en cuyo caso la imágen se hace sumamente grande, y va á pintarse á una distancia infinita del espejo, de suerte que es imposible colocarse en la posicion necesaria para verla. Pero si el objeto continúa aproximándose aun á la superficie del espejo, la imágen vuelve á aparecer mas allá de ella, al otro lado del observador, fig. 16: al principio aparece muy grande y derecha, á medida que se acerca el objeto va disminuyendo sin invertirse, y

en fin, cuando el objeto toca á la superficie del espejo, la imágen se forma en ella de su mismo tamaño. En esta segunda serie, en que se presenta siempre mas allá del espejo, la imágen no es ya una reunion real de luz, sino el sitio ideal en que se separarian los rayos reflejos si se prolongasen mentalmente mas allá de él, cada uno segun la direccion de su reflexion, como representa la figura.

Las apariencias producidas por los espejos convexos son mucho menos variadas. En este caso, la imágen es siempre ideal, y se forma mas allá del espejo; de manera que se la puede ver con la simple vista, pero no realizarla en un vidrio esmerilado. Cuando el objeto se halla colocado á una distancia muy grande del espejo, es recta, y parece formarse en el foco principal de él, fig. 17; y entonces aparece mas pequeña que parecia el objeto á igual distancia. A medida que el objeto se acerca á la superficie del espejo, la imágen se acerca tambien, permaneciendo siempre derecha, y aumentando sus dimensiones, hasta que al fin viene á coincidir con el objeto al llegar á la misma superficie.

Cuando se quiere hacer uso de espejos esféricos para investigaciones que exijan exactitud, es preciso saber determinar su foco. Si el espejo es cóncavo, se coloca en un cuarto poco iluminado, á alguna distancia de una ventana, y de donde puedan percibirse diferentes objetos bastante lejanos. Se dirije su concavidad hácia la ventana, inclinándole un poco á derecha ó izquierda, como se ve en la fig. 15; de modo que el foco de los rayos reflejos se proyecte en la parte oscura del cuarto. Entonces se coloca en esta direccion un vidrio ó un pedazo de carton blanco, que se acerca al espejo ó se separa, hasta que se pinten en él con claridad las imágenes de los objetos. Cuando se ha hallado el punto conveniente para este efecto, mide su distancia al centro de figura del espejo, y esta distancia duplicada da el radio de su curvatura. Pero este método exige, segun nues-

tras convenciones, que la superficie del espejo no ocupe sino una parte muy pequeña de la esfera á que corresponde; sin lo cual los rayos no se reunen rigorosamente en un solo foco, y no serian aplicables las aproximaciones de que nos hemos valido.

Si el espejo es convexo, la operacion es mas dificil. Entonces es necesario pegar sobre uno de sus diámetros una tira de papel negro D O, fig. 18, en dos puntos, de la cual se hacen dos agujeritos circulares á igual distancia del centro de figura. En seguida se espone el espejo á la luz del sol; los rayos luminosos se reflejan en las dos aberturas, y se separan desde un punto, que es el foco de los rayos paralelos. Se mide, pues, su separacion á diferentes distancias de la superficie del espejo, y de estos datos se deduce el punto de concurso, cuya distancia á la superficie debe ser la mitad del radio de la esfera. Este método necesariamente es susceptible de poca exactitud; pero si se necesitasen obtener medidas muy exactas, lo cual es rarísimo con esta especie de espejos, podrian conseguirse por medio del esferómetro que hemos descrito en el libro 1.º

Cuando solo se quieren comprobar por la observacion los diferentes resultados que hemos deducido de las fórmulas, es igual con corta diferencia emplear espejos metálicos ó de vidrio. Sin embargo, es necesario advertir que estos últimos producen siempre dos imágenes, una reflejada por la primera superficie y otra por la segunda; y aun esta es ordinariamente la mas luminosa; porque para aumentar la intensidad de la reflexion, se aplica á la superficie posterior del vidrio una capa metálica, compuesta de una amalgama de estaño y mercurio; de suerte que hablando exactamente, un espejo de esta especie se compone de dos, uno anterior de vidrio, y otro posterior, de metal. Esta duplicacion de imágenes no ofrecece un grave inconveniente, cuando solo se trata de observar los resultados generales de la reflexion; pero seria intolerable tratándose de observa-

ciones exactas, sobre todo si hubiesen de aumentarse las imágenes por medio de vidrios colocados junto al ojo, como hay que hacer en las operaciones astronómicas; y asi en estos casos solo pueden usarse los espejos metálicos. En uno de los siguientes capítulos veremos el modo con que deben emplearse para formar los instrumentos llamados *telescopios catóptricos*.

CAPITULO IV.

Del heliostato.

La mayor parte de las esperiencia de óptica, y principalmente las que tienen por objeto el estudio de las propiedades fisicas de la luz, se hacen en rayos solares introducidos en un cuarto oscuro por una abertura muy pequeña hecha en el postigo de una ventana; pero esto presenta dos inconvenientes: el primero la oblicuidad de los rayos sobre el horizonte, y el segundo el movimiento contínuo del sol.

La oblicuidad de los rayos hace que despues de haber entrado en el cuarto se dirijan hácia el suelo; de suerte que no es posible hacer observaciones con ellos sino en tamaños muy pequeños; y ademas, como los rayos no pueden introducirse sino durante un corto número de horas, esto limita la duracion y la facilidad de las esperiencias. En fin, el movimiento contínuo del sol hace variar la direccion de los rayos, de suerte que es preciso mover cada instante el cuerpo que se les quiera presentar.

Este inconveniente se evita por medio de una máquina inventada por S′ gravesande y llamada por el mismo *heliostato*, porque proporciona el medio de dirigir y fijar el rayo solar en la direccion que se quiera elegir.

Esta máquina representada en la fig. 19, se compone de dos piezas principales; un espejo plano metálico MM, y un relox, que hace mover este espejo de tal suerte, que el rayo solar reflejo permanezca

perfectamente inmóvil, y conserva siempre la misma direccion.

El espejo se hace de metal y no de vidrio, para evitar la doble reflexion, y para que pueda tomar libremente todas las posiciones que se quieran, se montan de modo que tenga dos movimientos de rotacion rectangulares, uno al rededor de un eje horizontal AA', y el otro al rededor de un eje vertical CP que le sirve de base.

Para que el relox pueda conducirle se adapta á su espalda una varilla perpendicular CQ, llamada *cola del espejo*, cuyo estremo Q es conducida por la manecilla C' R, por medio de una pieza FF, que se ve representada por separado en la fig. 2c. Esta pieza, en forma de horquilla, tiene en su base un cabo cilíndrico *qq*, que entra con libertad en un agujero cilíndrico hecho en el estremo R de la manecilla, perpendicularmente á su direccion; de suerte que por medio de este mecanismo la horquilla FF puede girar al rededor del eje *qq*. Entre los brazos de esta horquilla está colocado un tubito cilíndrico *tt*, que gira libremente al rededor de un eje de rotacion *aa* perpendicular á su longitud: de suerte, que combinando este movimiento con el de la horquilla al rededor de *qq*, puede el tubito tomar en el espacio todas las direcciones imaginables. Esto supuesto, cuando se quiere unir al relox la cola del espejo, se quita la horquilla FF, se pasa el estremo *q* de la cola por el tubito *tt* que tiene exactamente el mismo diámetro, se coloca de nuevo la cola de la horquilla en el estremo de la manecilla, y el movimiento de esta se comunica al espejo. Mas para que la marcha de este sea tal, que el rayo reflejo permanezca fijo, es necesario que la muestra del relox se halle colocada en el plano del ecuador, y que haya entre la posicion del espejo y la del relox ciertas relaciones de distancia, que no pueden determinarse ni aun esplicarse sino por medio del cálculo.

CAPITULO V.

Consideraciones generales sobre las fuerzas que produce la reflexion de la luz en las superficies de los cuerpos.

Despues de haber hallado las leyes esperimentales de los fenómenos, es necesario tratar de investigar sus causas mecánicas, es decir, determinar sistemas de fuerzas, capaces de producir los mismos efectos; porque consiguiéndolo se ha conseguido llegar al orígen mismo de estos fenómenos, y conocer sus relaciones naturales y necesarias; y entonces, en vez de detenerse en sus detalles se les considera en sus principios; lo cual es incomparablemente mas sencillo. Tratemos, pues, de conseguir este objeto en los fenómenos de la reflexion.

Estos fenómenos parecen á primera vista simples resultados de la elasticidad, que obliga á las moléculas luminosas á reflejarse en las superficies de los cuerpos pulimentados, como una bola de marfil refleja sobre un plano de mármol, formando el ángulo de reflexion igual al ángulo de incidencia. Pero esta idea, que es la primera que ocurre, y ha sido la que primero se ha adoptado, no tiene fuerza ninguna despues de examinada.

Aunque no conozcamos las dimensiones absolutas de las partículas luminosas, podemos conocer fácilmente que deben ser muy pequeñas á tal punto, que los mejores microscopios no pueden nunca aumentarlas de modo que se hagan perceptibles á nuestros ojos: pues si no fuese asi no podrian atravesar como atraviesan grandes masas de agua, de vidrio y otros cuerpos diáfanos. ¿Cómo de otra manera pudieran hallar un libre paso por medio de los poros de estas sustancias, no solo sin perder nada de su velocidad, sino aun aumentandola como veremos mas adelante? Y en fin, cuando con tan enorme

velocidad vienen á millones cada instante á herir las delicadas membranas de nuestros ojos, ¿cómo podrian no hacerlas mil pedazos, causándonos mil y mil dolores si su grande tenuidad no hiciese su choque casi insensible? Su tenuidad, pues, debe ser grandísima para que el efecto de este choque sea insensible. Segun esto, ¿qué proporcion puede haber entre la pequeñez de estas partículas y las asperezas que quedan en la superficie de los cuerpos mejor pulimentados? Bajo este aspecto, ¿puede haber alguna diferencia entre los cuerpos que llamamos pulimentados y los que no lo estan? Para pulir los cuerpos no hacemos mas que frotarlos con polvos duros que destruyan sus asperezas mas notables rayándolos en todas direcciones. Y las partículas de estos polvos, que podemos ver fácilmente con el microscopio y aun con la simple vista, ¿no son masas inmensas comparadas con las dimensiones de las partículas de la luz? Las rayas que dejan en la superficie de los cuerpos, ¿no deben ser bajo el mismo aspecto de una inmensa profundidad? Si la luz se reflejase, pues, al modo de los cuerpos elásticos, hiriendo contra la superficie de estos, las pequeñas partículas que la componen deberian esparcirse en todos sentidos sobre las eminencias de los cuerpos, ó perderse en sus profundas cavidades; y la reflexion que se verificase sobre los cuerpos mas pulimentados por medio del arte deberia ser tan grosera como sobre los cuerpos mas ásperos. Y pues por el contrario es incomparablemente mayor, mas regular y mas perfecta, es una prueba de que no sucede lo mismo que en la reflexion mecánica de los cuerpos elásticos, y que las partículas luminosas que se reflejan no llegan á estar en contacto con los cuerpos.

La fuerza que las rechaza obra, pues, fuera de esta superficie y á alguna distancia; y ademas opera, generalmente hablando, de un modo desigual sobre las diferentes partículas de un mismo rayo luminoso.

En la mayor parte de los casos en que se verifica la reflexion, se refleja una parte de la luz incidente y se transmite otra parte; ya sea que la fuerza repulsiva sufra en su accion intermitencias que la hagan unas veces mas enérgica y otras mas débil; ya sea, como parece muy probable, que todas las moléculas luminosas que se siguen en un mismo rayo no se hallen al momento de su incidencia en las mismas circunstancias físicas, y no sean por lo mismo igualmente susceptibles de ser rechazadas.

En cuanto á la naturaleza de la fuerza reflejante, nos es absolutamente desconocida. No sabemos si en realidad pertenece á las partículas de los cuerpos ó á las de la luz; si se verifica por repulsion ó por atraccion: y no considerando mas que sus efectos generales, se pueden imaginar una porcion de medios mecánicos, capaces de representarla. Pero sin decidir nada sobre este punto, siempre podremos compararla á una fuerza repulsiva que obra saliendo de la superficie de incidencia, y que conspira á rechazar cierto número de partículas de que se componen los rayos incidentes.

Figurémonos, pues, que la línea ondulosa AB, fig. 21, represente la superficie plana de un cuerpo con sus asperezas naturales ó solo con las que el arte no puede quitarle, y concibamos que todos los puntos de esta superficie, ó mas en general, que todas las moléculas de los dos medios contiguos que la componen ejercen á alguna distancia una fuerza repulsiva sobre las moléculas luminosas que se acercan á ellas. Esta fuerza deberá ser muy enérgica á la distancia á que se verifica la reflexion, puesto que es capaz de destruir la enorme velocidad que anima á las partículas luminosas, y hacerlas caminar en sentido contrario; pero, como todas las fuerzas químicas, deberá debilitarse rápidamente á medida que aumente la distancia. Si se disminuye el grueso del cuerpo reflejante desgastando poco á poco su segunda superficie A′ B′ sin tocar á la pri-

mera, no se altera absolutamente la regularidad de la reflexion, ni la cantidad de luz reflejada, á menos que el cuerpo quede reducido á un grado de tenuidad estrema, y tal, que es casi imposible conseguirle por medio del arte. Por consiguiente todas las moléculas situadas á una profundidad mayor que este límite no pueden estender su influjo repulsivo hasta la superficie reflejante, ó al menos hasta la distancia de esta superficie á que se hace la reflexion; y pues la fuerza que ejercen tan enérgica á distancias pequeñas, se debilita de este modo hasta llegar á ser insensible á una pequeña profundidad, resulta que decrece con una estrema rapidez por efecto de la distancia.

Concibamos ahora que un hacecillo de rayos de luz paralelos SM, SM′, fig. 22, suponiéndola de una estension indefinida, y consideremos lo que sucede á las partículas luminosas M M′, cuando se han aproximado lo bastante para empezar á sentir la accion repulsiva de las partículas del cuerpo. Si la superficie es perfectamente plana como AB, fig. 22, ó lo que es lo mismo, si sus desigualdades son insensibles con relacion á la distancia á que se estiende la fuerza repulsiva, la energía de esta será igual en todos los puntos de la superficie, y por consiguiente la reflexion se verificará del mismo modo respecto á todas las partículas luminosas M M′, cuyas direcciones, velocidades y disposiciones sean las mismas. Mas si la superficie reflejante se halla cubierta de elevaciones como E E′ E″, fig. 23, separadas por cavidades profundas como F F′, la intensidad de la fuerza repulsiva no podrá ser igual en todos estos puntos. Es claro que las moléculas luminosas que penetren en estas cavidades, no pueden reflejarse en la misma direccion que las que caigan sobre el plano inclinado de las eminencias, ni estas como las que vengan á dar sobre el lomo de las mismas. Aun mas; podrá tambien suceder que las que se introduzcan en las cavidades no pue-

den reflejarse afuera, siendo rechazadas hácia dentro por las repulsiones emanadas de las puntas de las elevaciones. Esta disposicion no puede, pues, producir sino una reflexion débil é irregular, como la que se verifica en la superficie de los cuerpos no pulimentados; y para que esto suceda no es necesario que las desigualdades de la superficie sean tan groseras que puedan percibirse al tacto, ó hacer sombras sensibles unas sobre otras, sino que basta que sean sensibles sus dimensiones con respecto á la distancia á que se estienden las fuerzas repulsivas. Tal es, por ejemplo, la idea que debemos formar de los vidrios planos que no han recibido aun el pulimento. Estos vidrios son planos si únicamente se considera la direccion general de su superficie, y ni se podria medir la altura de sus asperezas, ni encontrar puntas tan finas que pudieran penetrar en sus cavidades; pero estas desigualdades son aun muy fuertes respecto á la luz; y las oposiciones que resultan de ellas en la direccion de las fuerzas repulsivas debilitan la repulsion general de la superficie haciéndola al mismo tiempo irregular. Para remediar este inconveniente se trata de destruir estas desigualdades, ó á lo menos de debilitarlas todo lo posible, frotando la superficie del vidrio con cuerpos cuyas asperezas propias puedan destruirse fácilmente como el papel ó el tafetan, estirados y alisados por medio del frotamiento. El mismo efecto se conseguiria tambien disminuyendo la velocidad de las moléculas luminosas que tiene que vencer la repulsion de la superficie para producir la reflexion; y esto se logra haciendo mas oblícua la direccion de los rayos sobre la superficie reflejante, de modo que formen un ángulo mas agudo con la direccion de esta. Porque si suponemos la velocidad de las moléculas luminosas, descompuesta en dos direcciones rectangulares, una de ellas paralela á la superficie reflejante y la otra normal á ella, es evidente que esta será la única que tendrá que

vencer la repulsion de la superficie, y fácilmente se ve que disminuye al paso que se hacen mas oblícuos los rayos incidentes. La oblicuidad debe, pues, favorecer en esto á la reflexion, y ademas la facilita tambien en razon de que las moléculas luminosas penetran mas indirectamente en las cavidades, y quedan mas sujetas á la accion de los cúspides de las eminencias que, formando una superficie sensiblemente plana, producen una fuerza repulsiva conforme en toda su estension. Asi se ve por esperiencia que la reflexion se verifica del mismo modo en los vidrios sin pulimentar que en los pulimentados, cuando es muy oblícua la direccion de los rayos luminosos. Para hacer bien esta esperiencia, se mira de este modo por reflexion la llama de una bugía; y cuando el vidrio reflejante está bien pulimentado, la reflexion regular se verifica, cualquiera que sea la incidencia; mas si está pulimentado imperfectamente, la reflexion es muy débil ó nula cuando la direccion es perpendicular, y aumenta poco á poco á medida que los rayos llegan con mas oblicuidad, hasta que pronto viene á ser tan regular y exacta como en el otro vidrio. En fin, cuando la superficie está absolutamente sin pulimentar no se percibe ninguna reflexion regular desde la incidencia perpendicular hasta cierto grado de oblicuidad, y entonces se empiezan á ver imágenes regulares, pero muy débiles. La intensidad de estas aumenta con la oblicuidad, y llega al fin á ser tan perfecta como en los vidrios mejor pulimentados.

La condicion de la reflexion que acabamos de fundar en la destruccion de la parte de velocidad perpendicular á la superficie pudiera ocasionar una duda que debemos prevenir. Siendo nula esta velocidad normal respecto á todas las moléculas luminosas cuando los rayos incidentes son paralelos á la superficie del cuerpo, parece que entonces deberia reflejarse toda la luz; cuando por el contrario, la esperiencia nos hace ver que aun en este caso una

gran parte es atraida por el cuerpo, refractada si es diáfano, y absorvida si es opaco. Para conciliar estos dos resultados, contrarios en la apariencia, es preciso tener presente una circunstancia que hemos indicado ya antes, y que luego demostraremos rigorosamente, á saber, que todas las moléculas que componen un rayo de luz rectilíneo, no se hallan igualmente dispuestas á sufrir la reflexion, aunque tengan una velocidad de traslacion igual; porque sufren en sus mismas propiedades físicas intermitencias, periódicamente regulares, que á modo de magnetizaciones momentáneas, ya las disponen á ser atraidas por la superficie de los cuerpos, ya á ser rechazadas por ella. Ahora bien, todo cuanto hemos esplicado sobre los efectos de la repulsion no puede aplicarse sino á las partículas luminosas que se hallan en el momento en este último estado, y que efectivamente sufren la reflexion, pues las demas, ó se sustraen enteramente á la accion de las fuerzas repulsivas en virtud de la disposicion en que se hallan, ó se desvian sucesivamente en dos sentidos contrarios antes y despues de su paso por la superficie refringente, pues su direccion definitiva en el medio que penetran no se altera absolutamente, como probaremos despues.

Limitando, pues, nuestras consideraciones únicamente á las moléculas que se reflejan actualmente, tratemos de fijar de un modo geométrico las circunstancias generales de su marcha, contando solo con la condicion de la existencia de una fuerza repulsiva: y para simplificar mas la cuestion supongamos plana la superficie reflejante. Sea M, fig. 24, la posicion de una partícula luminosa, que moviéndose en el vacío, se acerque á la superficie en la direccion S I, y empiece á sentir el efecto de la fuerza repulsiva; representemos por I M la velocidad propia de esta partícula, y descompongámosla como antes en otras dos rectangulares, una de las cuales I N sea normal á la superficie reflejante AB.

y la otra MN, paralela á ella. Puesto que suponemos perfectamente plana la superficie reflejante, es claro que la resultante de las fuerzas repulsivas que provengan de ella será siempre perpendicular á su direccion, y por consiguiente perpendicular á MN; porque en virtud de la pequeñez de la distancia á que se hace sensible esta fuerza, se la puede suponer, como en la teoría de la accion capilar, como emanada de un plano de una estension infinita, y en este caso no hay razon ninguna que pueda hacerla inclinar mas á un lado que á otro, habiendo solo una escepcion en los bordes en que termina la superficie, los cuales forman una estension muy pequeña que deberá considerarse aparte. Ahora bien, puesto que en todo el resto de la superficie la fuerza repulsiva es perpendicular á MN, se sigue que durante el movimiento de las partículas luminosas, la parte MN de velocidad paralela á la superficie se mantendrá íntegra, sin sufrir aumento ni disminucion. Pero no sucederá lo mismo con la velocidad IN, normal á la superficie, pues siendo esta directamente opuesta á la fuerza repulsiva, será combatida por ella, débilmente al principio, cuando la distancia sea tal que empiece á obrar dicha fuerza, y despues con una intensidad creciente hasta que quede enteramente destruido todo el movimiento de la partícula luminosa en esta direccion. Cuando esto se verifique, la partícula luminosa no podrá seguir adelante, y obrando ya sola sobre ella la fuerza repulsiva, la obligará á retroceder, devolviéndola progresivamente todos los grados de velocidad que antes la habia quitado, hasta que al fin hallándose la partícula á bastante distancia de la superficie para que sea insensible la accion de la fuerza repulsiva, continúe su movimiento en línea recta con la velocidad que ha recobrado.

Asi, desde el primer instante en que la partícula luminosa empieza á sentir el influjo de la fuerza repulsiva, hasta el momento en que llega á la me-

nor distancia de la superficie reflejante, se halla impelida por dos velocidades: una MN, constante y paralela á la superficie, y la otra perpendicular á esta superficie é igual al esceso de NI sobre la intensidad de la fuerza repulsiva á la distancia en que se halla la partícula. Si esta fuerza no sufre intermitencias en su accion, la velocidad IN será siempre retardada, y entonces, segun los principios de mecánica, la molécula luminosa describirá un ramo de curva, convexo hácia la superficie, que al principio tendrá por tangente la direccion primitiva de la partícula, y vendrá á terminar en el punto *s* en que queda enteramente destruida la velocidad perpendicular á la superficie. Pero si la fuerza repulsiva sufre en su accion intermitencias que la hagan mas débil á ciertas distancias mas pequeñas, entonces la trayectoria descrita por la molécula luminosa deberá ser ondulosa, como representa la fig. 25, hasta que al fin su movimiento llegue á ser paralelo á la superficie en *s*, donde no se halla impelida sino por la velocidad constante MN. Despues de este momento, la partícula, rechazada siempre, empezará á separarse de la superficie con una velocidad contínua ó periódicamente acelerada; y como su velocidad paralela á la superficie es siempre constante, se sigue que describirá otro ramo de curva convexo hácia la superficie ú onduloso como el primero, y siempre simétrico con él, puesto que las fuerzas que obran sobre la partícula son las mismas á iguales distancias de la superficie á uno y otro lado del punto *s*. Por la misma simetría de la curva, la última tangente R′T′ formará con la superficie reflejante el mismo ángulo que la primera; y como la distancia á que empieza y deja de ser sensible la fuerza repulsiva es estremamente pequeña, la parte curvilínea de la trayectoria que se halla contenida en los mismos límites deberá ser igualmente muy pequeña; de suerte que la reflexion parecerá que se verifica de pronto en un punto *s* en la interseccion

del rayo incidente y el reflejo.

Hasta aqui hemos considerado el cuerpo reflejante como si existiese solo y aislado en el vacío, y por consiguiente hemos podido atribuir toda la reflexion á la sola potencia repulsiva de sus partículas. Pero si le suponemos rodeado de aire, de agua ó de cualquier otro medio material, debemos concebir que las partículas de este medio ejercerán acciones análogas sobre la luz. Y ¿qué sucederá entonces? Para saberlo consideremos una partícula luminosa, que haya llegado en el primer medio á cierta distancia de la superficie comun. Siempre podremos descomponer mentalmente la accion del segundo medio, sea atractiva ó repulsiva, en dos partes M y M′—M, una de las cuales M sea igual á la que ejercen á la misma distancia las partículas del primer medio, y la otra M′—M, igual al esceso de la accion del segundo medio sobre la del primero. Ahora bien, si el segundo medio solo tuviese la fuerza M, sucederia lo mismo que si no hubiese variacion de medio, y las moléculas luminosas, solicitadas igualmente en todas direcciones, continuarian su camino con la velocidad que hubiesen adquirido anteriormente. Tal es el caso de los medios homogéneos, como el agua ó el vidrio, en cuyo interior no se verifica reflexion alguna. El esceso de esta primera parte se destruirá, pues, siempre por sí misma, y solo tendremos que considerar el esceso de la accion del segundo medio, lo cual está comprendido en el caso que hemos examinado al principio.

En cuanto al valor mas ó menos considerable de esta diferencia, la práctica prueba que no depende solo de la densidad, pues como veremos en breve, algunos medios de igual, ó acaso menor densidad que otros, obran sobre la luz con mayor energía. Todo esto es conforme al curso ordinario de los fenómenos; porque si la accion de los cuerpos sobre la luz y de la luz sobre los cuerpos es análoga á las

afinidades químicas, es natural que dependa de la naturaleza química de las partículas, y aun de su forma.

Por lo que acabamos de decir se ve que es posible formar artificialmente medios heterogéneos, en cuyo interior no se verifique ninguna reflexion. Asi se realiza cuando se pegan entre sí dos pedazos de vidrio por medio de una capa de aceite de trementina espeso; si la union está bien hecha no se nota la superficie que separa los dos vidrios, y no se verifica ninguna reflexion. El aceite de trementina obra, pues, en este caso como el vidrio, y es indiferente que las superficies por donde se tocan los vidrios esten pulimentadas ó no. En este último caso el líquido llena todas sus cavidades, reemplaza las partículas de vidrio que faltan y produce un pulimento mucho mas perfecto que el que da el arte. Otro ejemplo de esta propiedad se presenta introduciendo en aceite de olivas pedazos irregulares de borax; pues estos, en virtud de sus desigualdades y de la falta de pulimento, no transmiten la luz de un modo regular cuando estan sumerjidos en el aire, y quedan perfectamente claros luego que se echan en el aceite de olivas que compensa todas sus desigualdades; y se produce tan poca reflexion en la superficie comun á ambas sustancias, que cuesta trabajo distinguir los límites de su separacion.

Se ve, pues, que un cuerpo transparente por sí mismo podria llegar á serlo mucho menos, y aun á hacerse enteramente opaco si se separasen unas de otras sus partículas, y se introdujese en sus intersticios un medio cuyo accion sobre la luz fuese muy diferente. Esto sucede en los líquidos diáfanos, en que se produce espuma introduciendo aire; porque no hay duda ninguna en que la accion del aire y la de estos líquidos sobre la luz es muy diferente. Asi, introduciendo este aire entre las partículas del líquido, se producen tantas reflexiones

sucesivas como ampollitas interrumpen la continuidad del líquido, y rechazando al fin estas reflexiones toda la luz incidente, ó diseminándola en el interior del cuerpo deja de ser transparente y se hace opaco; pero volveria otra vez á ser transparente, restableciéndose la contigüidad de sus partes, como sucede á la espuma cuando al perderse su aire vuelve al estado de agua. Esto se ve igualmente en una piedra porosa llamada *hidrophania*, que es perfectamente opaca cuando se halla seca, y se vuelve transparente cuando se la embebe en agua, porque su accion sobre la luz se acerca mas á la del agua que á la del aire. De donde se ve que la transparencia ú opacidad de los cuerpos no son cualidades propias de la materia que los compone, sino que únicamente dependen de la colocacion de sus partículas. Esto mismo lo veremos confirmado de un modo muy notable, cuando estudiemos esperimentalmente el modo con que nace y se aumenta la fuerza repulsiva segun el grueso de los cuerpos, hasta el límite en que la adicion de nuevas capas deja de tener una influencia sensible sobre la repulsion.

DIÓPTRICA.

CAPITULO PRIMERO.

Leyes generales de la refraccion simple.

Acabamos de examinar lo que sucede á la parte de luz incidente que se refleja sobre la primera superficie de los cuerpos: sigamos ahora á la que penetra en su interior.

Esta parte, cuando la incidencia es oblicua, no continúa su camino en línea recta, sino que se separa de su direccion; y este fenómeno es lo que se llama *refraccion de la luz*.

En todos los cuerpos no cristalizados el rayo refracto es simple, y sigue la prolongacion del plano de incidencia. En cuanto á la separacion que sufre depende de la diferencia que hay entre la densidad y naturaleza del medio de que sale la luz, y de aquel en que entra.

Si los dos medios son homogéneos y de igual densidad, la refraccion es nula, y el rayo continúa su camino en línea recta. Si son de la misma naturaleza, pero de diferente densidad, el rayo luminoso al entrar en el mas denso se acerca á la normal en su superficie comun. Y en fin, si son diferentes la naturaleza y la densidad de ambos medios, los dos elementos concurren al fenómeno, y el rayo se acerca á la normal en aquel medio, cuya accion sobre la luz es mayor. Establezcamos primeramente estos hechos por la esperiencia.

Si se coloca una moneda M en el fondo de un vaso AB, fig. 16, cuyas paredes son opacas, no se puede ver esta moneda sino colocándose en el cono de rayos directos RR′, que sale de ella, y que está terminado en A y B por los bordes del vaso. Pero si se llena este de líquido, la moneda M se hace visible en un cono mucho mas abierto, por ejemplo, OSO.′ Sin embargo, el cono de rayos que sale del punto M es el mismo que anteriormente; luego estos rayos se encorvan hácia la parte de afuera del vaso al entrar en el aire, y por consiguiente se separan de la normal AN, tirada á la superficie comun del líquido y del aire; mas quedando siempre en el mismo plano vertical que contiene el rayo incidente AM y la normal AN.

Otro ejemplo no menos comun se presenta introduciendo oblicuamente una vara derecha TT′ en una agua tranquila cuya superficie sea AB, fig. 27. En tal caso esta vara parece que está rota en el punto I á que llega el líquido: y la parte sumergida, aunque comprendida en el mismo plano vertical que la que queda fuera, parece mas próxima de

la horizontalidad que aquella. Para examinar las consecuencias de esta observacion supongamos que el ojo se halla colocado en el punto T, es decir, en el mismo estremo de la vara que se encuentra en el aire. Si los rayos que salen del líquido le llegasen en línea recta, deberia ver el otro estremo T′ en la prolongacion de T, en vez de que le ve mas elevado en T.″ Ahora bien, ya hemos observado en otra ocasion que nosotros suponemos colocados los objetos en la prolongacion de los rayos luminosos que nos envian; y puesto que consideramos el punto T′ mas alto de lo que realmente está, es preciso que el rayo T′I′ que nos le hace ver pase sobre T′ I, y siga una direccion quebrada, tal como T′ I′T. Por consiguiente si se tira del punto de incidencia I′ la normal N′ I′N á la superficie AB, es claro que el rayo luminoso T′ I′, al salir del líquido y entrar en el aire, se ha separado de esta normal como en el ejemplo anterior; pero quedando siempre en el mismo plano vertical que contenia el ángulo de incidencia.

La separacion de su direccion se verificaria en sentido contrario si el rayo pasase del aire al agua, pues entonces se acercaria á la normal. Para probarlo, tómese una cuba de vidrio de forma rectangular, y supongamos que ABCD, fig. 28, representa un corte horizontal de ella, llénese de agua, y hágase caer sobre la pared AB un rayo de luz horizontal SI, dirijido por un heliostato. Ciérrense las ventanas para dejar el cuarto oscuro, y será fácil observar la direccion del rayo refracto IR. Para esto basta pasear sobre la pared CD, opuesta al punto de incidencia, un circulito de carton ó vidrio esmerilado, hasta interceptar el rayo emergente: hallado este punto R, tirando de él la línea RI al punto de incidencia, esta será la direccion del rayo refracto, y comparándola con la del rayo incidente SI, se verá al momento que la refraccion le ha aproximado á la perpendicular N′IN tirada desde el

punto I á la superficie de incidencia AB.

Comprobado de este modo el fenómeno, es necesario saber qué relacion existe respecto á cada incidencia entre la oblicuidad del rayo incidente sobre la normal y la del rayo refracto, á fin de poder calcular una de estas direcciones siempre que se conozca la otra. Para esto conviene medir los ángulos de que se trata; lo cual puede hacerse colocando un semicírculo graduado fuera de la cuba y otro dentro de ella, y situándolos en las direcciones de los dos rayos, de modo que su centro se halle en el punto en que se verifica la refraccion. Observando la direccion del rayo incidente SI en el círculo esterior, se conocerá el ángulo SIN que forma con la normal comun á la superficie de los dos medios, y que aqui, del mismo modo que en la reflexion, se llama *ángulo de incidencia.* Igualmente se mide el ángulo RIN′ formado en el interior del líquido por la prolongacion de la misma normal con el rayo refracto IR, y asi se reconocen las dos leyes siguientes descubiertas por Descartes. 1.ª *El rayo incidente y el refracto se hallan siempre comprendidos en un mismo plano normal á la superficie comun de los dos medios.* 2.ª *El seno del ángulo de refraccion tiene con el seno del ángulo de incidencia una relacion constante bajo cualquiera incidencia, respecto á unos mismos medios* (1). Esta relacion se llama en física *relacion de la refraccion.*

Esta hermosa ley es el principio fundamental de toda la dióptrica. En efecto, dada que sea la direccion de los rayos incidentes, y la posicion de la superficie refringente, se podrá siempre deducir la

(1) Llámanse en geometría *seno de un arco* la perpendicular PM, fig. 29. tirada desde uno de los dos estremos M de este arco al radio CA que pasa por el otro estremo. La distancia CP del centro del círculo al pie del seno se llama *coseno* del arco; y la parte AT de tangente comprendida entre el punto de contacto A, y la prolongacion del radio CM se llama la *tangente trigonométrica* del arco AM.

direccion de los rayos refractos, ya inmediatamente si la superficie es plana, ya si es curva considerando la incidencia como si se verificase sobre el plano tangente. Despues, si se conoce la forma del medio refringente se podrá seguir el rayo por lo interior, determinar el punto por donde deberá salir, y el ángulo que formará con el plano tangente; de donde por último se sacará el ángulo de emergencia y la direccion del rayo despues de su salida.

La fecundidad de este principio exije, pues, que tratemos de comprobarle con la mayor exactitud, y al momento vamos á presentar los medios de conseguirlo; mas antes debemos hacer conocer un fenómeno muy notable que acompaña siempre al acto de la refraccion.

Este fenómeno consiste en que el rayo refracto se dilata en el plano de refraccion, y se *dispersa* en un espacio angular, cuyo vértice se halla en el punto de incidencia. Este ángulo está entonces lleno de rayos de diferentes colores; pues colocando un carton blanco ó un vidrio esmerilado que intercepte toda la luz refracta, se ve pintarse sobre su superficie una figura oblonga en que se distinguen principalmente el violado y el rojo en los estremos, y el verde y amarillo en el medio, del mismo modo que en el arco íris que aparece en la atmósfera. Los rayos violados sufren la mayor refraccion, los rojos la menor, y los verdes una refraccion intermedia. Se designan aqui estos rayos por los colores de que tiñen á los cuerpos con el objeto de abreviar; pues es evidente que los rayos en sí mismos no son ni violados, ni verdes ni rojos, y que estas denominaciones solo espresan las impresiones particulares que producen en nosotros.

Este fenómeno se llama *dispersion de la luz*, y es tanto mas sensible en un mismo medio, cuanto mayor es el ángulo de refraccion; y en medios diferentes es tanto mayor á igual incidencia, cuanto mas fuerte es la refraccion. No es posible hacer es-

periencia ninguna sobre la refraccion sin que este fenómeno se presente, y por esta razon nos ha parecido conveniente indicarle desde luego. Mas adelante se estudiará detenidamente; y hasta entonces debe suponerse que se trata de examinar la refraccion de los rayos amarillos ó verdes, que son, poco mas ó menos intermedios de los demas.

Tambien debe advertirse que hay sustancias en que la luz no se refracta en un solo hacecillo, sino en dos, de los cuales uno es el que sigue la ley descubierta por Descartes. El camino que sigue el otro está sujeto á una ley mucho mas complicada que Huygheus ha determinado, y que se esplicará despues. Por ahora nos limitaremos á considerar la primera especie de refraccion que se verifica en todos los cuerpos, y se llama *refraccion ordinaria*. La otra, llamada *refraccion estraordinaria*, solo se observa en los cuerpos cristalizados, y aun solo en aquellos cuya forma primitiva no es un octaedro regular ni un cubo.

Determinacion exacta de la relacion de refraccion en las sustancias sólidas.

El modo con que acabamos de medir la relacion de refraccion, y por el cual hemos reconocido su constancia, no puede considerarse sino como una aproximacion propia para indicar la ley general del fenómeno. Ahora es necesario establecerla con exactitud, y el medio mas sencillo de conseguirlo es el de construir un prisma recto, triangular con la sustancia diáfana que quiere observarse, medir en seguida las separaciones que sufre un rayo luminoso al atravesar este prisma con diferentes incidencias, y ver si pueden calcularse todas, segun una relacion constante de refraccion.

Sea ABC, fig. 30, una seccion hecha en el prisma con un plano perpendicular á sus aristas. Supongamos en este mismo plano un rayo luminoso SI

que caiga sobre la superficie del prisma en el punto I, y se refracte en la direccion II.′ Segun la primera ley de la refraccion, las dos rectas SI II′ deben estar en un mismo plano normal á la superficie refringente, y por tanto quedarán en el plano de la seccion ABC que llena estas condiciones. El rayo refracto, despues de haber atravesado la sustancia del uno, encontrará en I′ la segunda superficie, y se refractará en ella, volviendo á pasar al aire en una direccion IO que estará tambien comprendida en el plano de la seccion ABC. En este caso, un observador colocado en un punto cualquiera de esta direccion, por ejemplo O, recibiria á un mismo tiempo el rayo refracto I′O y el directo SO que viniese inmediatamente desde el objeto luminoso. Si la luz no sufriese ninguna separacion al atravesar el prisma, estos dos rayos se confundirian en uno solo; luego su separacion SOI′ es causada por la refraccion que ha sufrido el primero, y por consiguiente en cada posicion dada del objeto luminoso, el prisma y el observador, la separacion SOI′ dependerá directamente de la refraccion; de manera que para comprobar la indicada por Descartes no hay mas que emplearla en el cálculo, y comparar sus resultados con la observacion. En efecto, se puede determinar asi el ángulo de emergencia CI′O, conociendo el ángulo de incidencia BIS y la relacion de refraccion, ó recíprocamente determinar esta cuando se conocen los dos ángulos. El cálculo de esta relacion bajo diferentes incidencias puede probar si es cierto que sea constante, como ha enunciado Descartes; y en efecto, se ve que se verifica asi con la mayor exactitud.

Comprobada, pues, esta verdad, una sola medida de la separacion I′OS, verificada en un prisma de un ángulo dado, y bajo una incidencia conocida, basta para poder calcular la relacion de refraccion de la sustancia que le compone. La observacion puede hacerse de muchos modos. Si se trata

por ejemplo, de una sustancia sólida, no hay mas que formar con ella un prisma, y aplicarle sobre el goniómetro circular que nos ha servido para medir los ángulos diedros, fig. 31, tomando todas las disposiciones y haciendo las comprobaciones necesarias para que la seccion de las dos caras coincida con el eje central del círculo; y cuidando ademas de que el cristal del centro sea muy delgado y tenga sus dos caras muy paralelas. Entonces se coloca la corredera S por donde entra el rayo luminoso, en una posicion en que aquel pueda refractarse por el prisma, se hará mover la otra corredera O hasta tanto que el ojo colocado detras de ella perciba por refraccion la imágen de S. Cuando esto se verifique, la division circular dará la medida de los ángulos que forman los ángulos incidentes y refractos SC, OC con las dos superficies del prisma cuya posicion é inclinacion son conocidas. Con estos datos el cálculo determinará la relacion de refraccion respecto á la sustancia de que está hecho el prisma.

Si la luz natural pasando por el agujerito de la corredera S quedase demasiado débil despues de la refraccion para producir una imágen bien sensible en O, se puede invertir la marcha de los rayos colocando debajo de O la llama de una bugía, una lámpara ó cualquiera otra luz viva, y el ojo detras de la otra corredera S, que se hará mover hasta que se perciba por refraccion el rayo luminoso.

Hemos dicho que el cristal del centro que sostiene el prisma debe tener sus dos caras bien paralelas; porque si no fuese asi daria á los rayos luminosos una separacion, que se atribuiria falsamente á la sustancia que se esperimente, en vez de que siendo perfectamente paralelas, el rayo, despues de haber atravesado el vidrio, si vuelve á entrar en el aire tomará la misma direccion que tenia antes de su incidencia, ó si penetra en el prisma sobrepuesto, tomará la misma direccion que si hubiese entrado en él directamente. Estas propiedades resultan

de la constancia de la relacion de refraccion; el cálculo las deduce y la esperiencia las confirma.

Ademas, es necesario que el vidrio sea muy delgado, y que la refraccion se verifique cerca del borde del prisma, á fin de que los rayos incidentes y refractos puedan suponerse como si partiesen exactamente del centro de la division circular. Por lo demas si se aspira á una exactitud estrema, será fácil correjir por medio del cálculo este pequeño defecto de centralidad. Aqui nos limitamos á indicar este medio de observacion por ser el mismo que nos ha servido para la reflexion.

En todas estas esperiencias la dispersion que sufre el hacecillo de rayos de luz refracto, le divide en una infinidad de tintas, entre las cuales pueden distinguirse siete mas marcadas que las otras, que son el rojo, el naranjado, el amarillo, el verde, el azul claro, el azul oscuro y el violado; y puesto que estos colores se hallan separados en el rayo emergente; es claro que las partes del rayo incidente que las produce tienen diferentes refrangibilidades, y pueden apreciarse por sus separaciones. De este modo se halla que la menor refrangibilidad se verifica en el rojo, y va aumentando hasta el violado. Del mismo modo se halla, variando las incidencias, que la relacion del seno de refraccion con el seno de incidencia es constante respecto á cada color, aunque diferente entre ellos; pero esta constancia es dificil de comprobar por sola la observacion de la separacion absoluta, porque no hay nunca seguridad de colocar el ojo exactamente sobre la misma tinta en las diferentes esperiencias. Por esta razon nos limitamos aqui á enunciar la constancia de la relacion de refraccion como una cosa muy verosímil, y mas adelante se buscarán medios de establecerla rigorosamente.

Sin embargo, el conocimiento de la diferente refrangibilidad de los diversos colores proporcionará desde ahora una observacion muy esencial so-

bre el modo con que deben parecer distribuidos cuando se mira un punto luminoso á traves de un prisma refringente. Sea SI, fig. 32, un rayo blanco infinitamente delgado, que saliendo de un objeto infinitamente distante S, se refracta por el prisma ABC. Despues de salir de él se dividirá en un hacecillo V I′ R, cuyo estremo mas refracto I′ V será violado, y el menos I′R rojo distribuyéndose entre los dos todos los demas colores. Ahora bien, si un observador coloca su ojo en O, en la prolongacion del rayo rojo, es evidente que no recibirá ninguno de los otros rayos contenidos en el hacecillo R I′ V; pero si por el punto O se tira una línea O i′ paralela á I′ V, el observador recibirá en esta direccion un rayo violado nacido de otro rayo incidente. Si emanado igualmente del objeto S, y asi como el primer hacecillo no le enviaba mas que el rayo rojo R I′, del mismo modo el hacécillo provenido de S i le enviará solo el rayo violado i′ O. Pero otros rayos incidentes comprendidos entre S I y S i le enviarán las tintas intermedias y recibirá asi la sensacion de todos los colores del espectro, como si hubiese recibido en un carton blanco todo el hacecillo refracto RI′V. Sin embargo, los rayos mas refrangibles serán los que le parezcan mas desviados de su direccion primitiva, y por consiguiente los mas inmediatos á la base BC del prisma; y este carácter, que arreglará con respecto á él la distribucion de los colores, será tambien un índice de su mayor ó menor refrangibilidad.

Esta observacion, aunque muy simple, es sin embargo muy esencial, porque sirve en una infinidad de casos en que por el órden de los colores es menester inferir la mayor ó menor refraccion que han sufrido.

Determinacion de la relacion de refraccion en los liquidos.

El método que acabamos de esplicar se aplicaria

igualmente á las sustancias líquidas si con estas pudiesen construirse prismas; mas ya que esto no puede ser, es muy fácil contenerlos en vasos prismáticos, cuyas paredes esten formadas por vidrios planos y paralelos; pues no cambiando estos las direcciones definitivas de los rayos que los atraviesan, la refraccion que se observa es enteramente producida por el líquido. Asi es que estos vasos cuando estan vacíos apenas hacen variar de posicion las imágenes de los objetos, al menos si los vidrios estan bien construidos, y el punto luminoso se halla muy separado en comparacion de su grueso.

Pero para unir entre sí estos vidrios y formar un vaso capaz de contener los líquidos, es necesario ó sujetarlos ó pegarlos. Limitándose á sujetarlos con tornillos es muy dificil que el líquido no se salga; y pegándolos puede el líquido atacar el gluten con que esten pegados, y hacer esto variar la refraccion. El inconveniente es aun mayor, cuando se quieren observar líquidos volátiles, como el amoniaco, los aceites esenciales y muchos ácidos. Felizmente se pueden evitar todas estas dificultades por un método inventado por Mr. Cauchoix, que es sumamente sencillo.

Se toma una lámina de vidrio rectangular, como de un centímetro de grueso, y cuatro ó cinco de ancho, importando muy poco que el vidrio sea puro ó impuro, transparente ú opaco. En su centro se hace un agujero ó canal cilíndrico como de unos dos centímetros de diámetro, y se acaba de trabajar dándole la forma de un prisma, segun representa la fig. 33, cuidando de que sus dos caras queden muy planas y bien pulimentadas. De este modo colocando sobre ellas otros vidrios igualmente planos con una ligera presion, se unen y adhieren por si mismos, por el efecto de las atracciones á distancia muy pequeña, cuyo principio hemos esplicado hablando de la capilaridad. De este modo se forma un verdadero prisma de vidrio hueco y sin ningun gluten, en el

cual se pueden encerrar todos los líquidos posibles sin que sufran ninguna alteracion.

Para introducirlos en él con facilidad, y sin tener que separar los vidrios, se hace en el grueso del prisma un canal lateral *a b* que se cierra con un tapon de vidrio esmerilado; y para que la adherencia de los vidrios sea aun mayor, y no se escurran sobre las caras sólidas del prisma por los movimientos que hay que darle, se aseguran por medio de barras triangulares de cobre, sujetas con tornillos contra las superficies de los vidrios.

Suponiendo, pues, que los vidrios empleados sean bien paralelos, es evidente que este aparato ofrece un verdadero prisma de líquidos, á traves del cual se puede observar la refraccion de estas sustancias como si fuesen sólidas, sin temor de que sufran alteracion ninguna. Se coloca sobre el goniómetro, fig. 31, ó en general se aplica á los aparatos que sirven para medir la refraccion, y se observa la separacion de los rayos luminosos como en un prisma sólido, cuidando únicamente de que pasen por la cavidad en que se halla encerrado el líquido.

Determinacion de la relacion de refraccion en las sustancias aeriformes.

La refraccion de los gases se observa como la de los líquidos, introduciéndolos en vasos prismáticos cerrados por vidrios paralelos; pero es necesario observar algunas condiciones dependientes de la constitucion de estas sustancias.

Los gases tienen una densidad mucho menor que los sólidos y los líquidos, y su refraccion es mucho menor respecto al mismo ángulo. Es, pues, necesario para hacerla sensible aumentar considerablemente el ángulo refringente del prisma en que se les observa. Borda construyó uno cuyo ángulo era de 143° 7′ 28″, que es el mismo que han empleado MM. Arago y Biot, para hacer una serie de espe-

riencias sobre la refraccion de los gases. Está construido con un grueso tubo de vidrio cilíndrico y hueco, cuyos dos estremos estan cortados en forma de prisma, y cerrados con vidrios paralelos pegados con mucho cuidado, fig. 34. El tubo está agujereado por abajo, y armado de una llave R que puede colocarse sobre una máquina neumática, ó sobre recipientes, lo cual proporciona poder hacer el vacío é introducir los gases que quieren observarse. Ya hemos dicho que respecto á una misma sustancia la refraccion no es la misma variando la densidad, y la densidad de los gases varía en términos muy considerables con los cambios de presion y temperatura. Es necesario, pues, observar estos dos elementos si se quiere reducir todas las esperiencias á términos comparables.

Para medir la presion se adapta al prisma un tubo vertical T V que comunica con su interior, y contiene un barómetro de sifon, cuyo brazo abierto es bastante largo, á fin de que el mercurio pueda elevarse hasta el nivel cuando se hace el vacío en el prisma. La altura á que el gas interior sostiene el mercurio del barómetro determina esta presion. Para conocer la temperatura se podria introducir en el prisma un pequeño termómetro; pero seria necesario colocarle en medio de su capacidad, lo cual interceptaria la vision; y es mejor colocar dos termómetros muy sensibles á la parte esterior del prisma, y muy inmediatos á sus superficies ó aun en contacto con ellas. La temperatura de estas superficies, indicada por los termómetros, puede tomarse sin error sensible por la del gas y el aire que estan en contacto con ellas por dentro y fuera, pues sabemos con cuánta facilidad se adaptan los gases á la temperatura de los cuerpos que los rodean. Por otra parte se toma toda especie de precauciones para que la temperatura varíe poco en el sitio de la esperiencia, y sobre todo para que no pueda variar sino muy lentamente.

Este prisma está colocado sobre un pie perpendicular á su longitud, que le mantiene en una situacion horizontal. El sitio de la observacion, y el objeto que sirve de señal deben elegirse de modo que el objeto se halle en el mismo plano horizontal que pasa por el centro del prisma. Se observa la separacion con un círculo repetidor, cuyo limbo se coloca en el mismo plano, al principio por aproximacion y en seguida exactamente; porque transportándose el anteojo superior de su limbo del objeto directo á la imágen refracta, uno y otra se hallan siempre en el mismo hilo horizontal que hay en el interior del tubo. Para comprobar la horizontalidad de los hilos es conveniente que la señal esté colocada en una de las fachadas de un gran edificio, que pueda ofrecer en su construccion grandes líneas niveladas, á las cuales se pueda arreglar. Entonces la mira mejor es un para-rayos vertical, que se proyecta en la bóveda celeste como una línea negra.

En este caso, lo mismo que cuando se trata de sólidos ó líquidos, la manera de observar consiste en dirigir alternativamente el anteojo superior del círculo al objeto directo y á la imágen refracta, á fin de medir la separacion. Pero como la que producen las sustancias gaseosas es siempre muy pequeña, aun con el gran prisma que acabamos de describir, es preciso para obtener su valor con exactitud multiplicar las observaciones, y tomar un término medio entre sus resultados á fin de compensar mútuamente los errores. Esto se consigue fácilmente por un método de repeticion, fundado principalmente en el giro alternativo del prisma de derecha á izquierda y de izquierda á derecha, de modo que pueda observarse sucesivamente con el mismo anteojo en estas dos posiciones, como representa la fig. 35.

La primera observacion que hay que hacer es la de la refraccion del aire atmosférico. En este caso se estrae el aire del prisma por medio de la

máquina neumática; y aunque esta operacion no produce un vacío absolutamente perfecto, sin embargo, cuando la densidad del aire interior se halla muy reducida, de modo que sostenga la columna barométrica solo á algunos milímetros de altura, se observa y se cuenta con esta observacion en el cálculo. De este modo se obtiene un prisma vacío ó casi vacío, sumergido en el aire atmosférico; y los rayos luminosos al penetrar en él deben sufrir una refraccion determinada por el esceso de fuerza refringente del aire esterior, que es lo que sucede en efecto. Si el anteojo superior del círculo se halla dirijido inmediatamente sobre la mira, luego que se interpone el prisma se ve separado de un modo considerable; lo cual es efecto de la refraccion del aire. Si se vuelve á colocar el anteojo sobre la mira, haciendo mover el limbo, y se hace girar el prisma enteramente, la separacion es doble asi como la refraccion. En las esperiencias de Mr. Biot, el prisma estaba colocado en una de las habitaciones del Luxembourg, en la parte que mira al observatorio, cuyos para-rayos le servian de miras. El giro dado al prisma hacia mudar el hilo del anteojo de un estremo al otro del edificio, ó para hablar con mas exactitud, permaneciendo fijo el anteojo, parecia que el edificio se separaba toda esta cantidad á derecha é izquierda del hilo. Por lo demas no se percibia ninguna dispersion sensible, aunque sin duda alguna se debia producir, pero tan pequeña que no podia observarse.

Cuando se quiere observar el aire con distintas densidades, el método es el mismo, solo que es necesario no estraer el aire interior sino hasta el límite que se elija; indicado por el barómetro.

Si se quieren observar otros gases distintos del aire atmosférico, se forma primeramente el vacío en el prisma; se nota la densidad del aire que queda en él, y se introduce el gas. Esta introducion se hace por medio de una cuba neumato-química de agua

ó de mercurio, si el gas es soluble en el agua. Es necesario que el prisma y la campana que contiene el gas esten unidos uno á otro por medio de una llave doble, como para pesar los gases, á fin de evitar las ampollitas de agua que pudieran introducirse en el cuello del instrumento.

Si se quisiese obtener dentro del prisma el vacío ó gases perfectamente secos, seria preciso colocar dentro del tubo de vidrio superior una cantidad de potasa cáustica que absorviese toda la humedad. Cuando estas sustancias obran en el vacío, su accion es rápida y la absorcion instantánea; pero en el aire ó en un gas es necesario algun tiempo para que los vapores se precipiten y se combinen con el álcali. Si por el contrario se quisiese observar la refraccion de los vapores acuosos, seria necesario emplear todos los medios posibles para humedecer el aire del sitio donde se hace la observacion, esparciendo en el agua colgando paños mojados &c., y sobre todo elevando su temperatura; pero deberia evitarse siempre que se introdujesen estos vapores en el prisma, porque adhiriéndose á sus superficies alterarian la vision.

En todo cuanto hemos dicho hasta aqui hemos supuesto que las caras de los vidrios que forman los lados del prisma son exactamente paralelas. Es probable que se aproximen mucho á esta condicion si se han trabajado con esmero; pero es muy poco verosimil que la satisfagan rigorosamente. Ahora bien, como la refraccion del vidrio es muy enérgica, y la del aire muy débil se ve bien cuánto hay que temer un error de esta especie por la grande influencia que tendria sobre los resultados. Para conocer si le hay, se abrirá la llave del prisma, ó se quitará enteramente el tubo superior á fin de proporcionar una libre entrada al aire atmosférico. Con estas circunstancias se observará la refraccion, como si el prisma estuviese vacío ó lleno de un gas. Si las superficies de los vidrios son exactamente paralelas, no

deberá notarse ninguna dislocacion en la mira, por efecto del giro dado al prisma, puesto que el aire interior y el esterior son exactamente homogéneos y de igual densidad; mas si la mira pareciese que se ha movido, no puede ser efecto sino de la falta de paralelismo; y la refraccion que haya deberá añadirse con su mismo signo á las demas observaciones, pues aqui sucede lo que en todas las cantidades muy pequeñas, cuyos efectos parciales no hacen mas que reunirse unos á otros en el resultado total.

Habiendo ya esplicado todo lo que corresponde á la disposicion de los aparatos y al modo de hacer las observaciones, solo falta deducir las relaciones de refraccion del aire y de los gases, lo cual es puramente una operacion de cálculo.

CAPITULO II.

De las lentes esféricas.

Los métodos que hemos empleado para calcular las separaciones que sufren los rayos luminosos al atravesar prismas terminados por superficies planas, pueden aplicarse al caso general, en que el medio refringente se halle terminado por cualesquiera superficie curva; porque aqui del mismo modo que en la reflexion de la luz pueden compararse los rayos luminosos á líneas rectas matemáticas, cuya refraccion en cada punto de una superficie se verifique exactamente lo mismo que se verificaria en el plano tangente. Basta, pues, calcular la posicion de este plano en cada punto de incidencia para determinar la separacion que debe sufrir el rayo luminoso: y este cálculo es siempre posible conocida la forma de la superficie.

En las aplicaciones usuales de la óptica no es necesario llegar á esta generalidad: porque no trabajándose nunca sino vidrios esféricos, que son los únicos que pueden ejecutarse con exactitud y facili-

dad, basta analizar y calcular las refracciones que producen. Para hacerlo con toda la sencillez posible, y aun para comprender bien los resultados que la análisis puede indicar, es necesario ante todo adquirir un conocimiento general de esta especie de vidrios, y ponerse al corriente en cuanto á sus principales propiedades.

Si concebimos una línea recta ó *eje* tirado por los centros de las dos superficies esféricas que terminan un vidrio semejante, y en seguida se hace pasar por este eje un plano secante, se obtendrá el *perfil* del vidrio que segun sea la direccion de las curvaturas que pueden darse á las dos superficies, tendrá necesariamente una de las formas representadas en las figuras 36, 37, 38, 39, 40, 41; y estas diferentes formas se distiguen por medio de denominaciones adoptadas generalmente, á saber:

1.° Vidrio convexo-convexo, fig. 36. La semejanza de esta especie de vidrio con una lenteja le ha hecho dar el nombre de *lente*, que despues se ha estendido á todos los demas vidrios esféricos.

2.° Plano-convexo, fig. 37. La concavidad y convexidad se consideran siempre con relacion á los objetos situados fuera del vidrio.

3.° Cóncavo-convexo, fig. 38 y 39. Estas dos formas se diferencian una de otra en que en la primera el vidrio es mas delgado en los bordes que en el centro, y en la segunda al contrario es mas delgado en el centro que en los bordes. Pronto veremos las particularidades que resultan de esta diferencia en la construccion.

4.° Plano-cóncavo, fig. 40.

5.° Cóncavo-cóncavo, fig. 41.

Todas estas especies de vidrios convienen entre sí en que los planos tangentes á las dos superficies que los terminan son paralelos entre sí en los puntos A_1 A_2 en que el eje atraviesa la lente; y desde estos puntos á los bordes del vidrio el ángulo de los dos planos tangentes va siempre aumentando mas y

mas, y de un modo simétrico á cada lado del eje. Un rayo luminoso que atraviesa un vidrio semejante se refracta precisamente como lo haria en un prisma formado por los dos planos tangentes á los puntos de incidencia y emergencia. Una lente esférica, cualquiera que sea su forma, puede pues, considerarse como un conjunto de prismas ó como un prisma de una abertura variable, cuyo ángulo refringente, nulo al principio en el eje $A_1 A_2$ del lente, va aumentando sucesivamente hasta los bordes.

Asi que, todas las especies de vidrios esféricos que hemos descrito, pueden dividirse en dos clases segun se halle dirigida hácia el eje $A_1 A_2$ de la lente, la base ó el cúspide de los prismas. La primera clase comprenderá las figuras 36, 37 y 38, y la segunda las figuras 39, 40 y 41.

Es fácil concebir la influencia de esta diferente disposicion de los prismas en la marcha de los rayos luminosos; porque si imaginamos un hacecillo de rayos incidentes paralelos entre sí y al eje $A_1 A_2$ de las lentes, es claro que todas las de la primera clase refractarán los rayos hácia el eje $A_1 A_2$ al paso que las de la segunda clase los separarán de él. Asi las primeras reunirán la luz del hacecillo incidente, y los otros la separarán; razon por la que se han dado á estas dos clases de lentes los nombres de *vidrios convergentes* y *divergentes*.

Examinemos mas por menor el modo con que se verifican estos fenómenos, y empecemos por la primera especie de lente, cuyo tipo general representa la fig. 42. Entre los rayos que componen el hacecillo incidente paralelo al eje $A_1 A_2$, ha de haber uno S A_1 que coincida con este mismo eje. Este rayo atraviesa la lente en los puntos en que son paralelas las dos superficies que la terminan, y ademas su incidencia y emergencia se verifica perpendicularmente á estas dos superficies. No sufre, pues, absolutamente ninguna separacion, y pasa conservando

siempre su direccion primitiva S A_1 A_2 F. Pero no sucede lo mismo respecto á los rayos situados á una pequeña distancia del eje, pues estos sufren una refraccion, aunque muy pequeña, porque el ángulo refringente del prisma que la causa es muy poco considerable. Van, pues, á cortar el primer rayo en algun punto, por ejemplo, en F; y como al paso que los rayos incidentes se separan del eje es mas fuerte la separacion que sufren, se cortan sucesivamente unos á otros en F, F_1, F_2, &c.; y el conjunto de todas estas intersecciones, suponiéndolas infinitamente próximas entre sí forma en general dos ramos de curva, que empiezan en el punto F en que se cortan los rayos mas inmediatos al eje, y terminan en F_2 en la prolongacion del último rayo que atraviesa la lente por sus bordes. Estas curvas se llaman *cáusticas.* Mas cuando las superficies de las lentes, comprenden solo un pequeño número de grados de las esferas en que han sido construidas, demuestra la esperiencia que se reunen muchos mas rayos en el punto F que en cualquiera otro, de suerte que la curva F F_1 F_2 se concentra casi enteramente en este punto, y por lo tanto se le da el nombre de *foco principal.* Su distancia es sensiblemente la misma en cada lente, sea la que quiera la superficie que se dirija á los rayos incidentes.

Haciendo iguales reflexiones acerca de los vidrios divergentes, cuyo tipo general representa la fig. 43, se concebirá que del mismo modo deben formar dos ramos de curva F F_1 F_2 igualmente simétricas á una y otra parte del eje; pero el *foco principal* F de los rayos inmediatos á este cae al mismo lado del vidrio que los rayos incidentes, de suerte que no se verifica una concentracion real de luz en este punto, como en ningun otro de la curva de las intersecciones. Entonces esta curva indica solo el sitio en que concurren las direcciones de los rayos emergentes prolongados.

En todas las figuras que hemos considerado has-

ta aqui, las lentes se hallan representadas como perfectamente simétricas al rededor del eje A_1 A_2, de suerte que este eje contiene tambien el centro de figura de su contorno esterior. Cuando esto se verifica se dice que el vidrio está *centrado exactamente*, y esta condicion es muy importante en las observaciones de óptica, como veremos muy pronto; y cuando no se verifica, el grueso de la lente en sus bordes es precisamente desigual, como manifiesta la fig. 44, en la cual A_1 A_2 es en realidad el eje comun de las dos superficies esféricas, y B_1B_2 es el eje aparente, tirado por los centros de los dos círculos que forman el contorno esterior del vidrio.

Sígue-e de aqui que los vidrios convergentes se hallan por necesidad bien centrados cuando sus bordes son cortantes, porque siendo nulo su grueso es igual por todas partes. Ademas, cuando hayamos aprendido á reconocer por esperiencia la posicion de los focos, veremos que se puede hacer uso de ella con mucha exactitud para comprobar la centralidad de toda especie de lentes.

Segun lo que hemos dicho antes acerca de la formacion de las curvas cáusticas, se ve que en los espejos, la concentracion de los rayos se hace con tanta mas exactitud, cuanto mas cerca pasan del eje de las lentes que atraviesan; asi es que en los instrumentos de óptica hay que cubrir muchas veces los bordes de las lentes y parte de sus superficies con anillos circulares opacos, que se llaman *diafracmas*. Entonces los rayos luminosos caen solo sobre la parte circular y central de la superficie de la lente que no ha sido cubierta. El diámetro de esta parte se llama *la abertura del vidrio*.

En general, en los usos ópticos que exigen exactitud, se da siempre á las lentes aberturas muy pequeñas en comparacion á los radios de sus curvaturas, no admitiendo sino hacecillos luminosos muy poco inclinados sobre el eje que une los centros de sus superficies, pues estos son los únicos medios de

obtener la precision y limpieza de la vision. De aqui resulta, que tanto en su incidencia como en su emergencia, los rayos encuentran siempre las superficies del vidrio casi perpendicularmente, lo cual debilita las separaciones que sufren, y facilita mucho los cálculos que hay que hacer para determinarlas.

Para fijar las circunstancias de esta disposicion de un modo geométrico, consideremos primero un solo punto radianet S, fig. 45, colocado delante de la primera superficie de un vidrio esférico. Por este punto y el eje del vidrio, hagamos pasar un plano que cortará la lente por uno de sus perfiles A_1 A_2 M M; y supongamos siempre que los rayos emanados del punto S se hallen muy poco inclinados sobre el eje A_1 A_2 X, y que sus puntos de incidencia y emergencia I_1 I_2, esten muy poco distantes de este eje, en comparacion á los radios de las dos esferas que forman el vidrio.

Si se colocan muchas lentes esféricas sobre el mismo eje que la primera, y el hacecillo emanado del punto S y las atraviesa sucesivamente, es claro que los rayos incidentes comprendidos en el plano de la figura, permanecerán siempre en el, puesto que este plano es normal á todas las superficies que atraviesan. Pero los rayos superiores ó inferiores á este plano, pasarán sucesivamente por distintos planos de incidencia y de refraccion, lo cual parece que debe hacer su marcha mucho mas dificil de calcular. Por fortuna este cálculo no es de ningun modo necesario, cuando son muy pequeñas las incidencias y emergencias, como se deben suponer siempre en los instrumentos de óptica, pues entonces estos rayos van á parar sensiblemente á los mismos focos que los demas, de suerte que basta seguir los primeros para hallar el sitio en que se forma la imágen de cada punto radiante; y segun esto solo tendremos que considerar la marcha de los rayos comprendidos en el plano que pasa por el punto radiante y el eje comun de todas las lentes.

En estas, asi como en los espejos esféricos, todas las determinaciones pueden deducirse de la distancia principal focal, y el método es el mismo que en aquel caso. Esta distancia es, pues, lo primero que debe buscarse, y se consigue fácilmente, cuando se conocen los radios de las dos superficies de la lente y la relacion de refraccion propia de su sustancia. La distancia focal, es igual al producto de estos dos radios, dividido por su diferencia y por la relacion de refraccion disminuyendo una unidad. Esto supone las curvaturas dirijidas en el mismo sentido, fig. 38 y 39; pues si se hallan en sentido contrario, fig. 36 y 41, es preciso tomar la suma de los radios en vez de su diferencia.

Con este dato se puede fácilmente hallar el foco de un punto radiante cualquiera, situado en el eje ó fuera de él. En efecto, sea S este punto, fig. 46 y 47, y MAA_1M el perfil de la lente que está representado por una simple línea para indicar que se supone muy delgada. Tiremos por el punto I el rayo incidente SI paralelo al eje AA_1X; este rayo, despues de las dos refracciones, vendrá á parar al foco principal F, de suerte que IF será la direccion del rayo emergente. Tiremos otro rayo incidente SA, dirijido al centro de figura de la lente; este la atravesará sin sufrir ninguna separacion, pues suponiendo infinitamente pequeño el grueso de la lente y paralelas sus dos superficies en AA_1, produce en este punto el efecto de un vidrio plano infinitamente delgado. No falta, pues, otra cosa sino prolongar SA en línea recta, hasta qué corte en f al primer rayo emergente, y el punto f será el foco comun de los dos rayos, asi como tambien de todos los que emanen del mismo punto radiante S. La fig. 46 representa el efecto de esta construccion en un vidrio convergente, y la fig. 47 en uno divergente. Traduciendo esta operacion al lenguage analítico se obtiene una fórmula general, que determina la longitud de la distancia focal, y la posicion del foco

con respecto á todas las curvaturas posibles de las superficies y á todas las situaciones del punto radiante. De aqui es fácil deducir las imágenes de los objetos de una dimension finita, pues no hay mas que aplicar la misma construccion á todos los conos de rayos emanados de los diferentes puntos que los componen: de este modo se hallarán los focos de estos conos, y su conjunto formará la imágen del objeto.

Determinacion de las imágenes producidas por vidrios divergentes. Uso de estas lentes para remediar las vistas demasiado cortas.

Apliquemos primeramente este método á las lentes divergentes. Sea M A M, fig. 48, una lente semejante, cuyo centro de figura sea A y coloquemos el objeto S S′ delante de su superficie á una distancia cualquiera, pero tal con respecto á su tamaño, que los limites de incidencia sobre la lente esten comprendidos en nuestras aproximaciones. Si del estremo S del objeto tiramos la línea S A al centro de figura de la lente, el cono de puntos incidentes emanado del punto S tendrá por eje S A, y su foco se hallará en algun punto de esta recta, al mismo lado de la lente, pues esta es divergente, por ejemplo, en *f*. El foco de S′ se hallará del mismo modo sobre S′ A, por ejemplo, en *f′*; y comprendiendo estos dos focos entre sí á todos los demas, *ff′* será la imágen del objeto, que se verá siempre derecha y mas pequeña que él, puesto que está comprendida entre las dos líneas que forman el ángulo S A S, y mas inmediata á su vértice A. Por otra parte el valor absoluto de su distancia á la lente será siempre menor que la distancia principal focal A F, y tanto menor cuanto mas cerca del vidrio se halle el objeto.

Segun esta construccion, cuando los rayos de luz que parten de un mismo punto del objeto S ó S′ han atravesado la lente, su marcha es exactamente la misma que si saliesen del punto correspondiente de la imágen *f* ó *f′*. Luego si un espectador coloca un

ojo en O O al otro lado de la lente, de modo que reciba todos ó parte de estos rayos, no verá los puntos S S′ ni sus intermedios sino sus imágenes f f'; y su órgano se sentirá afectado como si habiéndose vuelto el objeto mas pequeño hubiese sido realmente transportado al sitio en que se forman los focos. Verá, pues, este objeto fantástico recto, disminuido y aproximado. Pero aun cuando estos son en efecto los únicos elementos de la sensacion que se verifica en su ojo, el juicio que forme de la distancia del objeto y de su tamaño podrá ser muy diferente de lo que indican, porque su entendimiento podrá ser afectado al mismo tiempo por otros motivos enteramente independientes de la direccion de los rayos luminosos.

Para convencerse de este singular resultado, tómese un vidrio divergente cualquiera, por ejemplo, el ocular de un anteojo de teatro, que ordinariamente es cóncavo-cóncavo; y mírense por él objetos que supondremos muy distantes en comparacion á su distancia focal. Luego que el ojo se halle colocado á una distancia conveniente de la superficie posterior se verá una imágen muy clara de estos objetos, que estará recta como ellos, y parecerá mas pequeña; pero en vez de suponerla cerca del vidrio, y en el foco $f f'$ en que realmente se forma, parecerá mucho mas distante que el mismo objeto. Esta circunstancia proviene de que la sensacion del ángulo visual y la de la divergencia mayor ó menor de los rayos de luz que llegan á nuestros ojos, no son las únicas indicaciones que nos sirven para apreciar las distancias. A ellas unimos, sin pensarlo, las nociones que tenemos sobre el tamaño absoluto de los objetos, y un hombre que miramos á 20 metros de distancia, despues á 40 y luego á 60, nos parece siempre de un mismo tamaño absoluto. Sin embargo, los hacecillos de rayos de luz que le hacen visible á estas diferentes distancias se cruzan al entrar en nuestro ojo con ángulos muy diferentes, pues

son entre sí, poco mas ó menos, como los números 1, $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{4}$: de suerte que si juzgásemos simplemente por las aberturas de estos ángulos, los tamaños aparentes nos pareceria que decrecian en la misma relacion.

Esta costumbre que tenemos de combinar la idea del tamaño absoluto con la sensacion del ángulo visual para juzgar de la distancia de los cuerpos, la ocasiona la esperiencia constante de toda nuestra vida, y llega á ser tan rápida como la misma sensacion; ó mas bien, la sensacion que se transmite á nuestro entendimiento cuando miramos un objeto esterior, es el resultado compuesto de estas dos especies de datos; y la aplicacion involuntaria que hacemos de ella nos engaña cuando miramos por un vidrio divergente, porque como entonces los objetos que acabamos de observar á la simple vista, y cuya distancia y tamaño hemos graduado poco mas ó menos, se presentan de repente á nuestros ojos con las dimensiones mucho mas pequeñas, no inferimos simplemente que sus imágenes han disminuido, sino que suponemos que se han separado de nosotros; y ningun razonamiento puede evitar esta conclusion, aun cuando teóricamente conozcamos el error.

Esceptuando esta circunstancia, respecto á la cual son malos jueces nuestros sentidos, la observacion confirma exáctamente todos los resultados que indica la teoría, como puede comprobarse, no solo cuando el objeto se halle muy distante, como acabamos de suponer, sino tambien cuando se acerca poco á poco. Sin embargo, si llegase á estar muy cerca de la lente seria necesario que fuese muy pequeño, y que las superficies refringentes estuviesen colocadas casi perpendicularmente á los rayos que emanan de él, sin lo cual se saldria de los límites de incidencia y emergencia que abrazan nuestras aproximaciones.

Haciendo estas esperiencias se encuentra, que para ver claramente la imágen es necesario colocar el ojo á cierta distancia de la lente, que varía segun

las diferentes vistas. Si se acerca el ojo demasiado, la imágen se turba y se confunde, y por el contrario si se separa se hace mas pequeña, y mas dificil de percibir distintamente. Esto es una prueba evidente de que el ojo mismo es un instrumento de óptica que no puede concentrar los rayos con bastante exactitud, sino cuando caen sobre su superficie dentro de ciertos límites de incidencia. Supongamos, por ejemplo, que formando el punto luminoso S su imágen en F, fig. 49, aparezca esta clara, cuando el ojo se halla colocado en O O; entonces la vision se verifica por medio de un cono de rayos F O O, que tiene por base la superficie O O de la pupila, y por cúspide el punto F. Si el ojo se acerca mas á la lente, por ejemplo, hasta O′ O′, entonces la pupila intercepta un cono mas abierto, y por consiguiente los rayos F O′ que forman el contorno esterior de este cono caerán sobre su superficie con una incidencia mucho mas oblicua. Si esta oblicuidad llega á ser tal que el ojo no puede concentrar suficientemente los rayos de luz sobre la retina, la vision se verifica de un modo confuso, que es lo que se nota cuando se acerca demasiado el ojo á la lente, y por consiguiente al foco F, centro comun de los rayos emergentes. Si por el contrario, despues de haber encontrado el punto en que es mas clara la vision, se separa el ojo de la lente, la imágen que permanece siempre en el mismo sitio se halla mas distante del ojo, y por tanto debe parecer mas pequeña, y verse menos claramente sus por menores, como en general sucede á todo objeto que se separa; y esto es en efecto lo que se verifica.

Este límite de distancia á que cada espectador necesita colocar el ojo para ver del modo mas claro es desigual, segun las diferentes vistas. Las personas que tienen la vista que se llama *corta* se ven precisadas á aproximarse mas al foco F, y las que la tienen larga, se ven obligadas á separarse de él. Todo esto se esplica muy fácilmente, no olvidando que es-

te foco, desde donde empiezan á separarse los rayos, hace realmente el oficio de un objeto que estuviese colocado en F. Cada cual, para verle claramente tiene que colocar su ojo á la distancia á que le coloca ordinariamente para ver un objeto con la mayor claridad posible. Esta distancia es comunmente de ocho á diez pulgadas, (210 á 260 milímetros) cuando se trata de percibir los detalles de los objetos pequeños; pero se alarga mucho mas en ciertas personas que no distinguen absolutamente los objetos colocados á una distancia tan pequeña, y por el contrario se acorta mucho, y hasta 2 ó 3 pulgadas (50 á 80 milímetros) en las personas que tienen la vista muy corta. Estas personas se llaman *miopes* y las otras *présbitas*.

No quiere esto decir que la facultad de ver se halle limitada rigorosamente á cierta distancia respecto á cada ojo; por el contrario, este se encuentra dotado de una especie de flexibilidad, que le permite acomodarse hasta cierto punto á las diferentes distancias de los objetos; pero si se emplea mas allá de los límites á que puede llegar, las imágenes se confunden, y la vision se hace imperfecta. Asi es que aun las personas que tienen la vista mas larga, dejan como las demas de distinguir los pormenores de los objetos cuando estan colocados á una distancia demasiado grande: pero estos detalles desaparecen para las personas de vista corta, aun cuando los objetos estan mucho mas cerca.

Este defecto puede corregirse haciendo uso de una lente divergente, que se coloca entre los objetos y el ojo como representa la fig. 49. Esta sustituye á los objetos reales las imágenes que se forman en su foco, y no hay mas que darle una distancia focal, igual á la que se forma la vision mas clara con respecto al órgano á que se destina; entonces, colocando esta lente muy cerca del ojo, el miope verá los objetos distantes con la misma claridad que si estuviesen colocados cerca de él, aunque con el pen-

samiento continúe colocándolos á la verdadera distancia á que juzga deben existir. Pero es necesario que no emplee los mismos vidrios, á lo menos colocándolos muy cerca de los ojos, para ver objetos sumamente próximos; porque formándose entonces muy cerca del vidrio los focos de los rayos que emanan de ellos, sus imágenes se hallan demasiado inmediatas para que el ojo pueda distinguirlas perfectamente sin fatigarse. Será, pues, necesario para ver estos objetos emplear lentes de un foco mas largo, ó mas bien no servirse de ninguna, pues estos objetos son los que mejor perciben los miopes á la simple vista. Tambien es útil que la distancia principal focal de estas lentes sea un poco mayor que aquella á que se perciben mas distintamente los objetos pequeños, pues los ojos se fatigarian muy pronto con una inmediacion tan grande de las imágenes. Tal es el objeto de los anteojos ó espejuelos por cuyo medio se corrige la imperfeccion de las vistas demasiado cortas.

Se vé, pues, que tales vidrios serian perjudiciales á los presbitas que no pueden ver con claridad los objetos próximos por estarlo demasiado á su ojo; pues estando siempre el foco de las lentes convergentes mas inmediato que el objeto, aumentaría la dificultad de ver este por la interposicion de tales lentes. Por el contrario, en este caso es menester procurar separar las imágenes á mayor distancia que el objeto que las produce, lo cual se consigue por medio de los vidrios convergentes.

Determinacion de las imágenes producidas por los vidrios convergentes. Uso de estos para corregir las vistas demasiado largas.

Sea MAM, fig. 50, la lente convergente, y SS′ el objeto, que supondremos por ahora colocado mas allá de la distancia focal de los rayos paralelos. Por su extremo superior S tiremos un rayo SA

al centro de la lente, y este será el eje del hacecillo de rayos que emanen del punto S, suponiendo, pues, la lente muy delgada, el foco de este hacecillo se formará en algun punto de la prolongacion de SA, mas allá de la lente, por ejemplo, en f, como manifiesta la construccion general. Todos los rayos emergentes que salen de S se reunirán en este punto, y desde él se separarán como se separarían si saliesen de un objeto real que estuviese colocado en este punto. Si repetimos la misma construccion con el otro extremo S′, se hallará del mismo modo su foco f′ en la prolongacion del eje S′A; é igualmente obtendremos todos los focos intermedios, de donde resultará en ff′ una imágen inversa del objeto. Se ve, pues, que el trastorno nace de que la imágen se forma mas allá del punto en que se cruzan los ejes de los hacecillos de rayos de luz.

Esta imágen podrá hacerse sensible, recibiendo los rayos emergentes en un carton blanco, ó un vidrio esmerilado colocado en ff′ y aun á la simple vista, poniendo el ojo mas allá de este punto, á la distancia conveniente para ver con claridad un objeto real situado en aquel punto.

Si el objeto luminoso SS′, cuya imágen se observa, está colocado á una distancia muy grande, la imágen caerá al otro lado de la lente, casi en el foco principal F; y esto nos presenta un medio experimental para determinar la distancia focal de los vidrios convergentes. Al paso que el objeto se acerque al vidrio, la imágen se separará aumentando de tamaño; y cuando el objeto se halle á una distancia doble de la principal focal, fig. 51, la imágen será del mismo tamaño que el objeto. Si continúa acercándose, la imágen continuará aumentando y separándose; y en fin, cuando el objeto llegue al extremo de la distancia principal focal, fig. 52, la imágen se separará al infinito. Este resultado era facil de pre-

veer, puesto que la imágen y el objeto pueden cambiar recíprocamente sus posiciones; y si el objeto colocado á una distancia infinita de la lente produce su imágen en el foco principal F, inversamente, cuando se halle colocado en el foco F debe enviar su imágen al infinito. Entre estos dos límites la imágen se presenta siempre inversa.

Si aun continúa aproximándose el objeto, y llega á colocarse entre el foco principal y la superficie de la lente, fig. 53, entonces la imágen determinada siempre por nuestra construccion general, pasa al mismo lado que el objeto; es mas grande y está mas distante que él y derecha: al paso que el objeto se acerca al vidrio, se aproxima ella tambien y disminuye su tamaño; y en fin, cuando el objeto toca al vidrio, le toca tambien la imágen, y ambos coinciden en todos sus puntos.

Tales son las indicaciones de la teoría, con las cuales está perfectamente de acuerdo la esperiencia. Para convencerse de ello, tómese un vidrio convergente cualquiera, por ejemplo, el objetivo de un anteojo de teatro, y mírense por él objetos que supondremos muy separados en comparacion de su distancia focal, fig. 50. Colocando entonces el ojo de un modo conveniente se vé una imágen inversa de estos objetos, que puede hacerse sensible, como hemos dicho, recogiéndola en un carton ó un vidrio esmerilado. Pero aunque esta imágen se forma en realidad al lado que se halla el espectador, este no la supone allí, sino al mismo lado que el objeto, y mas distante que él ó menos, segun las demas razones que afectan su entendimiento.

Colocado así el ojo en la posicion en que se ve la imágen del modo mas claro, si se mide la distancia que hay de él á la lente se halla que es igual á la distancia focal de los rayos parale-

los; mas la distancia á que se verifica habitualmente la vision perfecta. Esto prueba que el ojo se coloca efectivamente para ver esta imágen, del mismo modo que si fuese para ver un objeto verdadero, y recibe impresiones iguales á las que aquel le causaria. Todo confirma este resultado, porque si se separa mas del vidrio, la imágen parece mas pequeña, y sus pormenores mas dificiles de percibir, como sucede con un objeto muy separado; y si por el contrario se acerca á ella el ojo, la vision se turba y se confunde como un objeto que se mira demasiado cerca. En este caso parece que aumenta su tamaño como el de un objeto que se acerca, y conduce esto á creer que está menos separada. En fin, llega á ser enteramente confusa y nada visible cuando el ojo llega á colocarse, en el mismo foco. Pero lo que es digno de observarse, es, que aproximando aun mas el ojo al vidrio vuelve á presentarse de nuevo la imágen, y entonces está recta, pero muy confusa. Su direccion no varía, al paso que se hace menor la distancia entre el ojo y el vidrio, pero disminuye su confusion, y al cabo llega á verse de un modo regular con sus contornos y sus dimensiones naturales, cuando el ojo llega á colocarse sobre la misma superficie del vidrio, siempre que se extreche la abertura de la pupila, mirando á traves de un agujerito hecho en un naipe.

En estas últimas experiencias los rayos llegan al ojo convergiendo; y puesto que se percibe la imágen, es una prueba de que la vision puede verificarse tambien de este modo, aunque con una claridad incomparablemente menor que cuando se verifica por medio de rayos divergentes.

Mas aquí puede muy bien preguntarse por qué aparece recta la imágen y se hace menos confusa al paso que el ojo se acerca al vidrio. Para resolver claramente estas dos cuestiones es necesario estudiar primero el caso simple en que el

objeto radiante se reduce á un punto luminoso muy distante, que es lo que se verifica, por ejemplo, mirando por un vidrio convergente á Venus ó á alguna estrella muy brillante. En este caso, representado en la figura 54, si el ojo se halla colocado primeramente en OO; mas allá del foco de los rayos paralelos, y á una distancia tal que pueda percibir distintamente la imágen, verá la de una estrella muy clara y muy terminada. Esta sensacion la próduce un cono de rayos divergentes que tiene su cúspide en el foco F, y por base la abertura OO de la pupila. Al paso que el ojo se acerca al vidrio, la base de este cono, que es siempre la misma, intercepta un número mayor de rayos y de rayos mas divergentes, es decir, que forman entre sí un ángulo mayor. Por esta razon no puede el ojo reunirlos todos en un mismo foco en la retina, y por consiguiente forman en esta membrana una pequeña señal circular como la que produciria un círculo luminoso colocado fuera del ojo. Así es que se ve ensanchar la imágen de la estrella y formar un disco, cuyo tamaño aumenta al paso que el ojo se acerca al foco. En fin, cuando llega á coincidir con este en O′O′, este disco es de igual tamaño que la lente, pues entonces la abertura de la retina, admite todos los rayos que la lente ha refractado. Pero continuando acercándose al vidrio sucede que el ojo pierde de nuevo cierto número de rayos, y siendo los primeros que pierde los que mas separados están del eje del cono, y por lo mismo los mas convergentes, resulta que cuando el ojo se encuentra muy cerca del vidrio, los rayos que pueden entrar en la pupila no tienen sino una convergencia muy debil, y por esta razon empieza á verse la imágen menos confusamente. Aplicando estos mismos principios á todos los puntos de un objeto estenso, se concibe porque se presenta menos confuso, al paso que el ojo se acerca al vidrio. En cuanto á su situacion

directa proviene de que los ejes de los hacecillos de rayos, no se cruzan antes de llegar al ojo.

Comprobados asi completamente los fenómenos que indica la teoría, respecto á los objetos muy distantes, es preciso observar otros que se hallen colocados á una distancia menor. En estos se verifican igualmente todas las otras indicaciones de la teoría, y se les ve del mismo modo cualquiera que sea la superficie de la lente á que se dirijan los rayos incidentes.

Ahora nos es ya fácil concebir la utilidad que dan á los présbitas las lentes convergentes; Si, por ejemplo, el objeto SS′, fig 55, se halla demasiado cerca del ojo OO, para que este pueda hacer reunir en la retina los rayos que emanan de él, no hay mas que refractar estos rayos por medio de un vidrio convergente MAM, colocado bastante inmediato al objeto SS′, para que este se halle entre él y el foco F de los rayos paralelos, y cuya curvatura sea tal, que las imágenes de los puntos S S′, se forman en los focos f, f′, precisamente á la distancia fO′, f′O, á que el ojo percibe con mas claridad. Asi se emplean estos vidrios para hacer ver á los présbitas los objetos inmediatos que han de ver con claridad, y tales son los que usan las personas de edad, que ordinariamente son présbitas. Por medio de esta útil invencion pueden leer, escribir, coser, y en general ejecutar todas las obras que exigen estar colocadas á corta distancia de los ojos, del mismo modo que si no se hubiese alargado el foco de su vista con la edad. Pero para ver los objetos distantes, se ven obligadas estas mismas personas á quitarse los anteojos, pues entonces hacen reunir los rayos á la parte del ojo, lo cual es una condicion esencialmente contraria á la claridad de la vision, como hemos esplicado antes.

De los microscopios simples.

El mismo artificio sirve tambien á los relojeros, y en general á todas las personas que tienen que trabajar con mucho cuidado en objetos pequeños. Mas entonces no es ya con el objeto de corregir los defectos de su vista que puede ser escelente, sino á fin de aumentar el tamaño de las imágenes de los cuerpos, y percibir mejor sus detalles. Para concebir bien esta útil aplicacion, sea OO, fig. 56 el ojo, y SS′ el objeto que se trata de ver distintamente y con grandes dimensiones. Si solo hubiera de cumplirse esta última condicion, se conseguiria poniendo el objeto muy cerca del ojo, pues el ángulo visual aumenta á medida que el objeto se acerca á nosotros, pero entonces la imágen se presentaria muy confusa, por que el objeto se hallaria mas acá de los límites en que puede verificarse naturalmente una vision clara. ¿Qué hay que hacer, pues, para remediar este inconveniente? Colocar muy cerca del ojo un vidrio convergente, y poner el objeto entre él y su foco tanto mas próximo al vidrio cuanto sea necesario para que su imágen ff′ se halle precisamente á la distancia Of, Of′, á que naturalmente se verifica una vision perfecta. Esto es siempre posible, pues la separacion de la imágen al vidrio puede variar desde cero al infinito, segun la distancia del objeto. Cuando por medio de algunos ensayos se haya encontrado la distancia que se busca, la imágen se verá distintamente, y ademas el ángulo visual fAf′ que subtende en el ojo colocado inmediato al vidrio, será igual al ángulo SAS′, bajo el cual se presentaria el objeto á la simple vista, si se pudiése ver con claridad á la distancia AP. Se obtendrá, pues, de este modo la doble ventaja de ver perfectamente, y bajo un ángulo mas abierto que el ordinario. Pero por la misma razon de no haber visto nunca así el obje-

to que observamos, la idea que formaremos de su tamaño efectivo, no se hallará modificada por ninguna esperiencia anterior sobre las relaciones de las distancias con los ángulos visuales; y como le veremos bajo un ángulo mucho mayor que á la simple vista, aunque con la misma claridad y á la misma distancia á que le colocaríamos para percibirle con claridad, juzgaremos que se han aumentado todas sus dimensiones, que es lo que se verifica constantemente. Las lentes convergentes destinadas á producir semejantes efectos, se llaman por esta causa, *vidrios de aumento.*

La proporcion del aumento se mide evidentemente por la relacion de los tamaños absolutos de la imágen y del objeto; relacion por que la construccion de la figura es la misma que la de sus distancias al vidrio, pues uno y otro se hallan comprendidos entre las líneas del mismo ángulo fAf′. Asi el aumento proviene de que la imágen se forma mas distante del vidrio que el objeto, y á la misma parte que este; y estas dos condiciones no pueden verificarse sino con las lentes convergentes.

Hemos supuesto el ojo colocado en contacto con la superficie del vidrio. Esta condicion es en efecto la que ofrece las consideraciones mas sencillas, y la que presenta mas *campo*, es decir, la que permite ver con el mismo vidrio mayor estension de objetos. Pero por la discusion anterior se ve que esta condicion no es indispensable para obtener imágenes aumentadas; y en efecto, siempre que la imágen, aunque mayor y mas distante que el objeto se halle mas inmediata al vidrio de lo que debe estar para que la vision sea perfecta, se podrá separándose hallar el punto donde colocar el ojo para percibir con claridad.

Los ancianos emplean algunas veces vidrios convergentes muy anchos que colocan á alguna distancia de sus dos ojos, y que les sirven para leer, é igualmente se usan para estudiar las cartas geo-

gráficas muy detalladas. Facilmente se concibe que estos vidrios deben ser muy anchos para que ambos ojos puedan ver al mismo tiempo por ellos; y que su distancia focal sea bastante larga para que los ejes de los hacecillos de rayos dirigidos de un mismo objeto hácia cada ojo no formen ángulos demasiado grandes con el eje comun de las dos superficies. El aumento producido por estos vidrios varía necesariamente, segun la distancia á que se hallan del objeto que se mira, como se deja ver por las consideraciones anteriores, y su efecto es tanto mejor cuanto mas inmediatos están, pues entonces suponiendo que se muda por el centro del vidrio los rayos de luz que entran en la pupila de cada ojo, atraviesan el vidrio con incidencias muy pequeñas, conforme suponen nuestras aproximaciones. Pero en general, la necesidad de mirar con los dos ojos, obliga á inclinar los rayos sobre el eje de la lente mas que si se mirase con un ojo solo, y esta circunstancia, unida á la facilidad de aumentar como se quiera el tamaño, haciendo variar la distancia del objeto al vidrio y de él al ojo, hace que este instrumento sea peligroso para la vista. Así es que en el dia se usa muy rara vez, prefiriendo con mucha razon, los vidrios separados que aisladamente se aplican á cada ojo.

En general se emplean con un solo ojo estos vidrios y todos los instrumentos de óptica en que se trata de obtener un aumento notable con la mayor claridad posible. En este caso tambien prueba la experiencia que la posicion mas ventajosa es la de poner el ojo muy inmediato al vidrio, y no falta sino colocar el objeto mas acá del foco principal, y en tal disposicion que la imágen se halle situada á la distancia exacta que conviene para que se forme la vision distinta, lo cual se consigue en la práctica por medio de ensayos. El cálculo da tambien reglas para determinar esta posicion, con relacion á cada lente y á cada vista, asi como en-

seña á calcular el aumento que resulta. De esta manera se llega á obtener esta regla sencilla. Para formar un vidrio que aumente los objetos un número cualquiera de veces m aplicado al ojo, es preciso darle una distancia focal, igual á la distancia á que se forma la vision perfecta, dividida por el aumento menos la unidad, es decir, por m—S. Por ejemplo, si se toma por distancia media de la vision perfecta ocho pulgadas, ó 96 líneas, que es la distancia á que se forma ordinariamente, y se pide un vidrio que aumente 50 veces, su distancia focal deberá ser $\frac{96}{49}$ ó 1, 96 líneas; si se quisiese que aumentara 100 veces, su distancia focal seria $\frac{96}{99}$ ó 0, 9697 líneas, lo cual exigiria suponiendo el mismo género de curvatura, que el radio de cada superficie fuese menor. En general, disminuyen los radios de las superficies á medida que es mayor el aumento; lo cual presenta un obstáculo para llevar muy allá los aumentos con una lente sencilla. Tambien se ve claramente que la distancia focal disminuiria si fuese menor de 96 líneas el alcance de la vista; y en esto consiste que un mismo vidrio aumenta menos para los que tienen la vista corta que para los que la tienen larga.

He aquí, pues, con corta diferencia, todo lo mas que puede obtenerse con una simple lente microscópica, pero combinándolas con otras menos curvas, se obtienen efectos mucho mas considerables. De este modo se llegan á formar por medio de combinaciones de grandes vidrios ó de espejos y de lentes, sistemas que acercan y aumentan las imágenes de los objetos distantes. Tales son los anteojos de larga vista y los telescopios catóptricos. Haremos conocer los mas principales instrumentos de esta especie, luego que sepamos corregir la coloracion que producen las lentes descomponiendo la luz, coloracion que limitaria su uso de un modo intolerable si se la dejase subsistir.

Un medio muy sencillo para procurarse un

microscopio bastante fuerte, es el de hacer con un alfiler un agujerito circular en una lámina delgada de metal, é introducir en ella una gota de agua. Esta gota, colocándose en el agujero como en un cilindro capilar muy estrecho y muy corto, forma á ambos lados de la superficie de la lámina dos convexidades sensiblemente esféricas, y cuyo diámetro es el mismo que el del agujero. Los rayos de luz, atravesando este globulillo de agua, se refractan en él como en un vidrio convergente de un foco muy corto, asi que, poniendo el ojo muy inmediato al agujero, y mirando pequeños objetos colocados al otro lado del agujero, se ven muy claros y muy aumentados.

En todas estas aplicaciones de la teoría, se supone que las lentes concentran sensiblemente en un solo foco, los rayos paralelos que caen sobre su superficie, pero esta condicion no puede verificarse sino cuando son muy pequeños el grueso de las lentes, y su abertura en comparacion de los radios de sus superficies, que es, como hemos visto, el único caso que comprenden nuestras aproximaciones teóricas. Se vé, pues, que en la práctica es necesario para que las imágenes sean claras arreglarse á estas condiciones; y la esperiencia manifiesta muy pronto los límites en que es preciso contenerse. Sin embargo, se puede por medio de una combinacion feliz de curvaturas, aumentar la extension que admiten los vidrios, disminuyendo las observaciones de su foco, y aun pueden destruirse casi enteramente estas aberraciones, formando lentes compuestos de muchos vidrios; pero las disposiciones que producen esta ventaja, no pueden esplicarse sino por medio del cálculo. Aqui nos contentaremos con decir, que en general se dirigen á disminuir las incidencias y emergencias de los rayos en las diferentes superficies que sucesivamente se les hace atravesar.

CAPITULO III.

Teoria física de la refraccion.

Los métodos que acabamos de esplicar determinan la relacion de refraccion que conviene á cada sustancia en el estado en que se la observa, pero ya hemos hecho notar que esta relacion varía en cada sustancia, al mismo paso que su densidad. La variacion es poco sensible en los sólidos y en los líquidos, porque son poco considerables las dilataciones y condensaciones que pueden sufrir, pero no sucede lo mismo en las sustancias aeriformes, cuya densidad se puede variar en toda especie de proporciones por medio del cambio de presion y de temperatura. En tanto, pues, que no hayamos descubierto la union que existe entre la densidad de una sustancia y la refraccion que hace sufrir á la luz, no podemos conducir á términos comparables las observaciones hechas en cada sustancia, sino que todas quedarán aisladas, puesto que las circunstancias no son semejantes. Lo mismo sucederá si queremos comparar entre sí las refracciones producidas por diferentes sustancias, y no sabremos distinguir lo que proviene de la densidad ó de la naturaleza química de las partículas y de su colocacion.

Se vé, pues, que para penetrar mas íntimamente en estos fenómenos, es necesario buscar por medio de los movimientos del rayo de luz las fuerzas que obran sobre él, y en seguida investigar por el cálculo cómo determinan estas fuerzas los resultados particulares.

Sea AB, fig. 57 la primera superficie de un cuerpo ó medio refringente de cualquiera naturaleza. Consideremos un rayo de luz SI, que moviéndose en el vacío en una direccion casi paralela á la superficie del medio, venga á encontrar-

la al fin en el punto I; desde este instante el rayo no continuará su camino en línea recta sino que se refractará en una direccion IR que dependerá de la relacion de refraccion del medio que se considere. En el agua, por ejemplo, el ángulo RIR formado por el rayo refractado con la superficie refringente será de 41° 18′ 36″, de suerte que el rayo incidente se habrá separado toda esta cantidad. Ahora bien, como un cuerpo que se mueve no puede ser separado de su camino sino por una fuerza que se halle inclinada con respecto á su direccion, debemos inferir que las moléculas luminosas al acercarse á la superficie del medio, se hallan impelidas por fuerzas que conspiran á hacerlas entrar en él, y que estas fuerzas están dirigidas perpendicularmente á su superficie, pues el caso de la incidencia perpendicular es el único en que no alteran la direccion del rayo.

Es evidente que estas fuerzas no deben ser sensibles, sino á distancias muy pequeñas de la superficie, tanto dentro como fuera, porque el rayo de luz debe empezar á encorbarse desde el momento en que empiecen á obrar sobre él, y volver á tomar una direccion constante y rectilínea luego que dejen de impelerle: y como el espacio en que esta inflexion se verifica, es tan pequeño, que nuestros sentidos no pueden apreciarle, de modo que el rayo parece que se dobla de repente en el punto de incidencia, inferimos que la accion de las fuerzas refringentes no se estiende á mayor distancia.

Todos estos resultados concurren á manifestar que la refraccion de los rayos de luz se produce por la afinidad que las moléculas de los cuerpos tienen con las de la luz; afinidad análoga á la accion capilar, y que como ella solo es sensible á distancias muy pequeñas. Esta conclusion á que nos conducen los fenómenos, parece á primera vista contradictoria con la que hemos deducido de las esperiencias sobre la reflexion. Entonces las moléculas

luminosas parecian rechazadas por el cuerpo reflejante en vez de ser atraidas como suponemos aqui; pero es preciso observar que las moléculas que se reflejan, tal vez no se aumentan en el mismo estado físico ó en las mismas circunstancias de movimiento, que las que se refractan; y basta que esta diferencia sea posible, para que no haya una contradiccion necesaria en las dos consecuencias opuestas que sacamos de los fenómenos relativamente á estos dos estados de las partículas; porque cuando un cuerpo A obra sobre otro cuerpo B de un modo cualquiera, esta accion no depende solo del estado de A y de su naturaleza, sino tambien del estado y naturaleza de B. Mas adelante veremos que una multitud de pruebas confirman esta diferencia de estado de las moléculas luminosas y conoceremos en qué consiste.

Fijemos ahora, con arreglo á los fenómenos, las condiciones á que están sujetas las fuerzas atractivas, y consideremos una molécula luminosa M, fig. 58, colocada á una distancia cualquiera fuera de un medio refringente homogéneo, y modificada de suerte que se sustraiga á la accion repulsiva de las fuerzas reflejantes. Entonces esta molécula será solo sensible á la atraccion del medio, que obrará sobre ella perpendicularmente á la superficie AB, como acabamos de demostrar, y ademas será impelida con la misma intensidad á distancias iguales, cualquiera que sea el punto de la superficie delante del cual se halle, ya sea en M ya en m ya en μ; porque como esta especie de accion no es sensible sino á distancias muy pequeñas, todas las moléculas M, m μ, que no se hallen infinitamente próximas á los estremos A y B del medio son atraidas por él con la misma fuerza que si fuese infinitamente estenso, y la intensidad de estas atracciones debe ser igual en todas partes, pues suponemos el medio homogéneo. Aun para no tener que considerar en su accion mas que las variaciones progresivas depen-

dientes de la distancia, supongámosle no cristalizado, de suerte que las modificaciones de fuerza atractiva que pudieran depender de la figura de sus partículas, se compensen en la confusion en que están colocadas. Entonces, suponiendo que la distancia *a* A sea aquella á que la atraccion del medio empieza á separar de su direccion las moléculas luminosas, la línea *ab* paralela á AB figurará el límite esterior donde empieza á doblarse el rayo. Es claro que este límite no debe mirarse como rigoroso y matemático, porque hablando matemáticamente la accion atractiva del medio debe entenderse á cualquiera distancia; mas como en pasando de una muy pequeña, llega á ser tan debil que su efecto es insensible, espresamos gráficamente esta circunstancia fijando cerca de la superficie una distancia muy pequeña, como el límite donde el rayo empieza á doblarse de un modo sensible.

Supongamos ahora que habiendo ya pasado de este límite la partícula luminosa M, se acerca mas al medio; entónces será atraida por él con mayor fuerza, y la atraccion aumentará progresivamente hasta que la partícula llegue á tocar á la superficie del medio.

Cuando haya atravesado esta superficie, la atraccion empezará á disminuir, y decrecerá progresivamente, al paso que la partícula se introduzca en lo interior del medio. En efecto, supongamos que llega á una profundidad cualquiera, por ejemplo, á M′. Para conocer el grado de fuerza que entónces obra sobre ella, tiremos por el punto M′ la línea *c′d′* paralela á la superficie AB, y mas abajo tiremos otra A′B′ que diste de c′d′ tanto como AB. Entonces las dos partes iguales del medio limitadas por la línea c′d′ y por AB, A′B′ atraerán la molécula M′ igualmente y en sentido contrario. Estas dos partes se equilibrarán, pues, mutuamente, y la molécula se hallará solo impelida por la parte escedente del medio situada mas allá de A′B′ y separada de ella la cantidad A′c′

igual á $A'a'$. Si el grueso de este resto pasa del límite á que son sensibles las fuerzas atractivas, la intensidad de la atraccion será la misma que si la molécula se hallase fuera del medio, y tan distante de él, como ahora se halla introducida, porque en razon á la pequeña distancia á que es sensible la atraccion, la parte del medio separada por $A'B'$ es siempre infinitamente delgada, y el resto del medio cuando escede la esfera de actividad de estas fuerzas, puede considerarse como indefinido.

Resulta de este razonamiento que los límites de las atracciones interiores y esteriores se hallan igualmente distantes de la superficie. Cuando la molécula luminosa ha llegado á esta profundidad, si se quitan las partes del medio que se equilibran mutuamente encima y debajo de ella, el resto del medio se halla demasiado distante para poderla atraer sensiblemente.

Reasumiendo los resultados que acabamos de obtener, se vé, que el rayo incidente SI conserva su direccion rectilínea hasta el primer límite *ab* en que empiezan á ser sensibles la fuerzas atractivas; que desde este punto empieza la accion naciente de estas fuerzas á doblarle formando una curva tangente en I á su direccion primitiva, y cuya concavidad está vuelta hacia el interior del medio, como representa la figura. Esta curva continúa asi hasta el límite interior *a*, *b*, en que de nuevo se hace insensible la accion de las fuerzas atractivas. Entonces el rayo toma la direccion rectilínea que le han dado definitivamente la refraccion, y que es la prolongacion de la última tangente á la curva que ha descrito. La estension de esta curva es muy pequeña para que nuestros sentidos puedan percibirla, pero el pensamiento la aumenta, y es menester considerarla para unir la direccion del rayo incidente con la del rayo refracto.

Para hacerlo de un modo completo seria preciso que conociésemos la ley que sigue el aumento de

la fuerza atractiva, al paso que las moléculas luminosas se acercan á la superficie refringente; y nada sabemos de esta ley sino que produce un aumento muy rápido, é igual á distancias iguales en toda la estension de la superficie. Por fortuna estos datos generales, bastan para llegar á los resultados que mas nos importa obtener.

Para representar el aumento de la fuerza atractiva del modo mas general, dividamos el espacio en que es sensible, en una infinidad de zonas muy delgadas, por medio de líneas $c\,d$, $e\,f$, $g\,h$, &c, paralelas á la superficie del medio, y al primer límite $a\,b$, fig. 59. Supongamos, despues, que en cada una de estas zonas, la intensidad de la fuerza atractiva sea sensiblemente constante, de manera que solo crezca al pasar de una zona á la siguiente; continuemos esta construccion en el interior del medio hasta el segundo límite en que deja de ser sensible la fuerza atractiva. Esto supuesto, si absolutamente no establecemos ninguna relacion entre los valores sucesivos de la fuerza en estas diversas zonas, no habrá ninguna ley tan general que no pueda representarse de este modo; y la semejanza será tanto mas perfecta, cuanto mas se multipliquen las zonas, de modo que llegaria á ser exacta si su número pudiera ser infinito. Podremos, pues, emplear esta ficcion para representar los progresos de las fuerzas atractivas, y si deducimos resultados independientes del número de zonas, podemos estar seguros de que corresponden tambien á las fuerzas atractivas, cualquiera que sea la ley que sigan estas.

Todo se reduce, pues, á considerar lo que sucede cuando una molécula infinitamente pequeña, arrojada en el vacío con cierta direccion y velocidad, atraviesa una zona comprendida entre dos planos paralelos, entre los cuales es impelida por una fuerza aceleratriz constante. Resuelto este problema, con respecto á la primera zona podremos calcular la direccion que habrá adquirido la molécula luminosa,

asi como el aumento de su velocidad; y no habrá mas que volver á empezar el cálculo con estos datos, respecto á la segunda zona, pasando en seguida á la tercera, y asi sucesivamente en todo el espacio en que son sensibles las fuerzas atractivas.

Este problema es precisamente el del movimiento de los proyectiles en el vacío, suponiéndolos únicamente animados por la gravedad. Resolviéndole, pues, se halla que respecto á una misma sustancia, la relacion entre el seno de incidencia y el seno de refraccion es constante en todas las inclinaciones posibles, como nos ha manifestado ya la esperiencia. Ademas se halla que esta relacion es la misma que la de las velocidades de la luz despues que ha penetrado en el cuerpo á una profundidad sensible y antes de penetrar en él; esta velocidad inicial es siempre mas débil que la otra, si el rayo pasa del vacío á una sustancia material, de suerte que se acelera refractándose.

En fin, la análisis, descubriendo todas las particularidades del fenómeno, nos enseña á deducir de las esperiencias, sino el valor absoluto de la fuerza atractiva, á lo menos una cantidad proporcional á su intensidad en cada cuerpo. Esta cantidad es el cuadrado de la relacion de refraccion, menos la unidad, dividido por la densidad de la sustancia refringente, á la que Newton ha dado el nombre de *poder refringente*. Su evaluacion supone que las partículas materiales que componen un cuerpo de una estension sensible obran sobre la luz en este estado de reunion, como obrarian en el estado de aislamiento; y asi la aplicacion del resultado solo puede ser legítima cuando pueda admitirse esta condicion. Pronto examinaremos por medio de la esperiencia cuáles son los casos en que esto se verifica.

Consideremos ahora lo que sucede á la molécula luminosa, acercándose á la segunda superficie del medio, que para mayor sencillez supondremos paralela á la primera, fig. 60. Las fuerzas atracti-

vas del cuerpo tendrán la misma accion junto á sus dos superficies; y por consiguiente representaremos del mismo modo por las paralelas a_2 b_2 a_3 b_3, los límites, tanto interiores como exteriores en que dejan de ser sensibles. Esto supuesto, mientras la molécula luminosa no llegue al límite interior a_2 b_2, continuará moviéndose en línea recta, con la velocidad constante que ha adquirido al refractarse; pero luego que haya pasado este límite empezará á ser atraida de nuevo hácia el interior del cuerpo refringente por fuerzas variables, segun las zonas sucesivas que atraviese. Para calcular los efectos que estas fuerzas producirán sobre ella no hay mas que descomponer su velocidad en otras dos, una paralela á la superficie de emergencia A_2 B_2, y la otra perpendicular á ella. Es claro que la acion de las fuerzas atractivas no alterará en nada la primera velocidad perpendicular á su direccion; pero conspirarán sin cesar á disminuir la velocidad normal á que son paralelas y opuestas, puesto que esta velocidad conspira á hacer salir la molécula luminosa fuera del cuerpo, mientras las fuerzas atractivas conspiran á hacerla entrar en él.

Por consiguiente, desde el momento en que empiece á hacerse sentir la accion de estas fuerzas, la trayectoria de la molécula luminosa se doblará haciéndose convexa hácia la superficie de salida: pero á causa de la simetría de posicion que hemos supuesto entre esta superficie y la de entrada, las acciones que la molécula sufra en ellas serán exactamente iguales, de suerte que no perderá al acercarse á la segunda, sino lo que habia adquirido al separarse de la primera. Llegará, pues, á A_2 B_2 con la misma velocidad que tenia en A B, y luego que haya pasado este límite continuará siendo atraida por la accion del medio que aun la hará retardar atrayéndola hácia sí, pero con una energía que decrecerá al paso que se separe hasta que al fin deje de ser sensible cuando la molécula llegue al límite

esterior de las fuerzas atractivas a_3 b_3, despues de haber perdido gradualmente todos los aumentos de velocidad que habia adquirido al entrar en el cuerpo. Desde entonces la molécula no sintiendo ya la influencia de la atraccion del medio, continuará moviéndose con su velocidad primitiva en una direccion rectilínea, tangente al último punto de la curva que acaba de describir; y esta tangente, en virtud del paralelismo de las dos superficies, será paralela á la direccion primitiva que seguia la molécula antes de penetrar en el medio refringente.

Consideremos ahora el caso en que la superficie de emergencia en vez de ser paralela á la primera, esté inclinada á ella con un ángulo cualquiera, fig. 61. Entonces los límites á donde llega la accion del medio serán los mismos junto á esta superficie y podremos representarlos igualmente por las rectas a_2 b_2 a_3 b_3, tiradas á la misma distancia que antes. Ademas, la série de acciones ejercidas por el medio á diferentes distancias de la superficie de emergencia, será tambien la misma; pero serán diferentes las velocidades normales que estas acciones habrán de combatir; pues repitiendo aquí la descomposicion de estas velocidades, se vé que serán tanto mas débiles cuanto mas se acerque la direccion del rayo á la superficie de emergencia. Si su valor es aun tal que las fuerzas atractivas no bastan para destruirla, la molécula luminosa atravesará todas las zonas en que son sensibles estas fuerzas, pasará de su límite exterior, y habiendo vuelto á adquirir su velocidad primitiva se separará en línea recta y de modo que el seno de su emergencia esté con el de su incidencia interior en una razon constante. Pero tambien podrá suceder que la molécula luminosa llegue á la superficie de emergencia con una inclinacion tal, que su velocidad normal única fuerza que tiende á hacerla salir del medio, quede enteramente destruida por la accion creciente y continua de este antes de pasar de esta superficie; ó bien

podrá quedarla algun resto de velocidad suficiente para pasar mas allá de esta superficie, y este resto destruirse por la accion retardatriz del medio, antes de llegar al límite exterior a_3 b_3, en que deja de ser sensible esta accion. En uno y otro caso, á medida que se debilita la accion normal, la molécula luminosa cederá mas y mas á la accion de la otra componente, cuya intensidad no sufre ninguna pérdida, de suerte que la trayectoría se inclinará cada vez mas hácia la superficie de emergencia á que es paralela esta componente. En fin, si llega el momento de que esta quede sola, destruida enteramente la velocidad normal, hará describir á la partícula luminosa un pequeño elemento rectilíneo paralelo á la superficie de emergencia, y en seguida no hallando ya ningun obstáculo la accion atractiva del medio, volverá á hacer doblar su direccion, llamará hácia dentro á la partícula luminosa por un camino simétrico al que ha seguido al acercarse á la superficie de emergencia y volverá á comunicarla, en sentido contrario, los mismos grados de velocidad normal que la habia quitado; hasta que al fin habiendo llegado la partícula al límite interior a_2 b_2 en que las fuerzas atractivas dejan de ser sensibles, continuará su marcha en línea recta con la misma velocidad que tenia antes de entrar en las capas de atraccion variable, y siguiendo una direccion simétrica, de suerte que sean iguales los ángulos de incidencia y reflexion.

Por esta análisis se ve de dónde proviene el cambio de refraccion en reflexion que se observa efectivamente en ciertas circunstancias en la segunda superficie de los cuerpos; y se ve tambien que este cambio no está limitado á una sola incidencia sino que se pueden distinguir tres grados diferentes: primero, aquel en que se verifica la reflexion en la sustancia misma del medio entre el límite interior de las fuerzas atractivas y la superficie de emergencia, segundo, aquel en que se verifica en la misma

superficie de emergencia, y tercero, aquel en que saliendo la molécula luminosa fuera del medio y volviendo á entrar en él se hace la reflexion entre la superficie de emergencia y el límite esterior de las fuerzas atractivas. Este último caso es aquel en que el ángulo de emergencia calculado con arreglo á la ley de Descartes llega á ser de 90°, siendo el que determina la incidencia mas próxima á la normal en que se verifica la reflexion total. Por lo demas, veremos que estos diferentes límites llegan á ser muy apreciables por observacion, aunque las distancias que comprenden son enteramente insensibles; de suerte que la inflexion del rayo parece que se realiza de repente, y en el mismo punto en estos diferentes casos.

Hasta aquí hemos considerado los cuerpos sujetos á la esperiencia como contiguos al vacío; vamos ahora á examinar lo que sucede cuando la luz pasa de un medio refringente á otro contiguo al primero. Es fácil unir estos dos fenómenos, pues basta observar que entonces la molécula luminosa no es solo atraida por el medio de que va á salir sino tambien por aquel en que va á entrar.

Sea M fig 62, el primer medio, M′ el segundo, y A′ B′ su superficie comun. Mientras la molécula se halla en M á bastante distancia de esta superficie para que la atraccion que el medio en que se halla egerce sobre ella sea igual por todas partes é insensible todavía la del segundo medio, se moverá en línea recta con la velocidad constante que la haya comunicado el primer medio. Pero luego que entre en los límites de variacion de las fuerzas, empezará á sentir la accion simultánea de los dos medios que obrarán sobre ella en sentidos contrarios, procurando retardar su movimiento la del medio de que sale, y acelerarle la de aquel á quien se dirige; así que en último resultado no sentirá otra influencia que la de la diferencia que haya entre estas dos acciones, ambas dirigidas perpendicularmen-

te á la superficie comun A′B′. Segun esto, se ve que si el medio en que va á entrar obra sobre ella con mayor fuerza, penetrará siempre en él, pasará mas allá del límite interior de las fuerzas atractivas describiendo una curva, y en fin, continuará su marcha en línea recta, con una velocidad constante. Pero si por el contrario, el primer medio obra sobre la luz con mayor fuerza que el segundo, se podrá considerar la molécula luminosa como si se moviese en un medio, cuya accion fuese simplemente la diferencia de las acciones de ambos medios, y por consiguiente retardatriz, siendo A′B′ la superficie de emergencia. Entonces se hallarán todos los casos de emergencia y de reflexion interior que hemos reconocido anteriormente; asi que segun sea la incidencia, podrá suceder que la molécula luminosa se refracte, y en seguida se mueva en línea recta en el segundo medio, ó que la refraccion se cambie en reflexion, lo cual podrá verificarse del mismo modo que cuando la molécula sale al vacío en el interior del primer medio en la superficie comun á ambos ó despues de haber pasado al segundo medio. Pero en general, cuando el rayo pase de un medio á otro, cualquiera que sea el que obre con mas fuerza sobre la luz la relacion entre el seno de incidencia y el seno de refraccion, será constante y recíproco á la relacion de las velocidades en ambos medios.

Es preciso que tratemos ahora de comprobar estos resultados por la esperiencia, y de ver si sus pormenores están conformes con las indicaciones de la teoría. Desde luego, respecto á la constancia de la relacion de refraccion y su valor, cuando la luz pasa de un medio á otro, es muy fácil de comprobar; pues no hay mas que colocar verticalmente un prisma en una cuba rectangular, cuyas paredes sean vidrios de caras paralelas, fig. 63, y medir la separacion que el prisma hace sufrir á los rayos de luz, cuando la cuba está llena de aire, y cuando esta llena de un líquido trasparente cualquiera, cuya rela-

cion de refraccion sea conocida, pues los cambios que sufran estas separaciones serán tales como supone la constancia de la relacion de refraccion, ó bien despues de haber medido la separacion producida por un prisma bajo una incidencia determinada de los rayos de luz; estiéndase sobre una de sus superficies una capa de cualquiera sustancia transparente, cuyo grueso se igualará compriméndola con un vidrio pulimentado ó desgastándola y pulimentándola á ella misma. Entonces se hallará que la adicion de esta capa no altera en nada la separacion que se ha observado, permaneciendo la misma la incidencia, así, la relacion de refraccion que sufre la luz al penetrar en esta capa, queda exactamente compensada con la que sufre en la segunda superficie por donde toca al vidrio, de suerte que entra en este como si entrára directamente, lo cual es á un mismo tiempo consecuencia y prueba de las propiedades enunciadas.

Para observar ahora el efecto progresivo de la incidencia sobre la reflexion interior, constrúyase una cuba prismática AABB, fig. 64, cuyas caras anterior y posterior construidas de vidrio, puedan inclinarse gradualmente una á otra, permaneciendo siempre comprendidas entre dos planos de cobre paralelos, de modo que formen un vaso prismático de un ángulo variable, llénese este vaso de agua ó de cualquier otro líquido, colóquese verticalmente la cara anterior BB, y diríjase á ella perpendicularmente un rayo horizontal SI, reflejido por un heliostato. Penetrando así el rayo al líquido con una incidencia perpendicular, continuará por el camino en línea recta hasta la segunda superficie del prisma, donde generalmente sufrirá una reflexion parcial que hará volver una parte dentro del líquido, y desde allí fuera de él á O′ atravesando la superficie horizontal del líquido. El resto, despues de haber sufrido la accion de las fuerzas refringentes, saldrá refractándose en la direccion I′O, si la emer-

gencia es posible ó en el caso contrario será conducido tambien al interior, haciendo el ángulo de reflexion igual al ángulo de incidencia, é irá á unirse en O″ á la parte que se reflejó parcialmente. Para seguir todos los pasos de este fenómeno, colóquese al principio la cara AA vertical como la primera BB, y entonces se formará una placa líquida de caras paralelas, y se verá pasar el rayo sin sufrir ninguna separacion, como si no se hallase interpuesto ningun cuerpo. Pero por poco que se abra el ángulo, empezará á hacerse conocer la refraccion, y hará salir hácia arriba el rayo emergente; y esta separacion se aumentará al paso que se habra mas el ángulo; lo cual hará que la incidencia interior se verifique en una direccion mas próxima á la superficie de emergencia; y en fin, llegará un término en que la oblicuidad será tal, que la emergencia apénas será posible rasando el rayo á su salida la superficie de la segunda cara, fig. 65. Pasado este término absolutamente no saldrá, sino que todo él se reflejará interiormente, fig. 66. Esto empezará á verificarse cuando el seno de la incidencia interior, contada desde la normal, sea igual á la unidad dividida por la relacion de refraccion; y desde entonces la reflexion interior continuará verificándose bajo cualquiera otra abertura mayor del prisma que haga la incidendia interior mas próxima á la segunda superficie. Estos pormenores son en todo conformes con las indicaciones que nos ha dado la teoría segun la consideracion de las fuerzas atractivas.

Aqui debemos insistir en una particularidad que nos será muy útil en adelante, á saber, que en el momento en que la emergencia se halla próxima á no poderse verificar, fig. 65, no cesa de repente con respecto á todo el rayo, sino que la parte de este, que produce la sensacion del rojo, es la última que desaparece. En efecto, debe suceder asi, si, como hemos observado ya, esta parte se compone

de rayos menos refrangibles que los otros, y cuya relacion de refraccion se acerca por lo mismo mas á la unidad.

Podria tambien preguntarse en qué consiste que cierto número de moléculas se reflejan interiormente bajo todas las incidencias, aun cuando sus velocidades de traslacion, descompuestas perpendicularmente á la superficie refringente, sean suficientes para hacerlas salir. Consiste en que ademas de su movimiento de traslacion, único que hemos considerado hasta aqui, se hallan afectadas estas partículas por circunstancias físicas particulares, que esplicaremos mas adelante, y que favorecen la accion que ejercen sobre ellas las fuerzas reflejantes de la segunda superficie; accion á que se sustraen las otras partículas, que no se hallan tan bien preparadas para obedecerla.

A falta de un prisma de ángulo variable, como el que acabamos de describir, se puede observar el efecto de la reflexion interior de un modo muy sencillo, colocando un prisma triangular ABC, fig. 67, entre la luz y el ojo, de modo que los rayos incidentes SI, que entran por la primera superficie AB, se reflejen sobre la base BC, y en seguida salgan por la otra superficie AC. Si se quieren seguir todas las graduaciones del fenómeno, es necesario colocar primeramente el ojo bastante alto para ver por refraccion los objetos situados debajo de la base BC. En esta posicion, los rayos SII′, que vienen de los objetos esteriores, se refractan tambien en I′, y salen al aire. Pero bajando un poco mas el ojo, llega un término en que los objetos colocados debajo de BC dejan de ser visibles por refraccion; y por el contrario los objetos esteriores situados mas allá de AB, se pintan en la base BC como en un espejo. Entonces los rayos refractos II′ se hacen demasiado oblicuos respecto á BC para poder salir al aire, y se reflejan interiormente; y como ningun rayo emanado de los objetos que se hallan debajo

de BC puede, refractándose en el prisma, separarse tanto de la normal N′ I′, ninguno de ellos puede llegar al ojo. Asi es que luego que empieza á verificarse esta reflexion total, continúa realizándose en todas las posiciones en que la oblicuidad sea mayor.

Para fijar los límites exactos de esta desaparicion, supongamos que N′ I′ I″ sea el mayor ángulo de refraccion posible con respecto á los rayos que entran en el prisma por la base BC, y tiremos el rayo emergente I″O que resulta despues de la sesegunda refraccion en la superficie AC. Si por el vertice del ángulo C se tira la línea CO′ paralela á I″O, es claro que ningun rayo que entre por la caja BC podrá penetrar en el ángulo O′CC′ comprendido entre esta recta y la prolongacion de la base del prisma. Asi mientras el ojo se halle colocado en este espacio, todos los objetos situados debajo de BC serán invisibles por refraccion.

Es inútil observar que los fenómenos de la reflexion interior no pueden nunca observarse mirando al través de la misma cara del prisma por donde entran los rayos incidentes, como representan las fig. 68 y 69. Si el prisma está colocado como en la primera de estas figuras, el rayo refracto I I′ no podrá nunca reflejarse totalmente sobre la segunda superficie; y si por el contrario, la disposicion del prisma es la de la fig. 69, el rayo reflejo I′ I″ no podrá volver á salir por la primera superficie, antes que empiece á verificarse su reflexion total sobre la segunda.

Volvamos á tomar el método de observacion que acabamos de emplear, fig. 67; pero en vez de dejar toda la base BC del prisma en contacto con el aire, colóquese una gota de agua en uno de sus puntos, por ejemplo E. fig. 70. Entonces, haciendo girar lentamente el prisma sobre su eje, y colocando el ojo en O, de modo que reciba los rayos reflejos SII′ provenides de las nubes, se observará que la reflexion total empieza á verificarse en toda

la parte de la base BC que está tocando con el aire, antes que se verifique en el punto E en que se halla la gota de agua, de modo que esta permanece por mucho mas tiempo visible á través del grueso del prisma por medio de los rayos que emanan de ella directamente. Poco á poco y bajando el ojo hácia la base BC, para hacer mas oblícuos los rayos, la reflexion total llega á verificarse en el punto E, y la gota de agua desaparece.

Todos estos fenómenos son consecuencias necesarias de la teoría. Cuando los rayos refractos IE caen sobre la base BC con una incidencia inmediata á la perpendicular, no se reflejan interiormente, aun en los puntos de la base que se hallan en contacto con el aire. Recíprocamente, todo rayo que viene de los objetos esteriores colocados debajo de la base del prisma, que se presenta bajo esta incidencia, le penetra y llega al ojo. Pero cuando bajando este, los rayos refractos llegan mas oblícuamente á la base BC, hay un término en que la accion del aire en contacto con esta base no es bastante fuerte para obligarlos á pasar, y por consiguiente se reflejan en su totalidad despues de haber salido del prisma y antes de llegar al límite esterior de las fuerzas atractivas. Pero la incidencia en que se verifica este fenómeno es distinta con respecto al punto E, en que se halla adherida la gota de agua; porque la accion atractiva de esta sobre la luz es mucho mas enérgica que la del aire, lo cual hace muy poderosas las fuerzas normales que tienden á dar salida á las partículas de luz; y asi es necesario bajar mas el ojo para que se verifique la reflexion interior en el punto E en que se halla la gota, y solo cuando se ha llegado á esta inclinacion desaparece enteramente. En este momento hay una porcion de rayos SI emanados de los objetos esteriores, que atraviesan la gota de agua á una distancia infinitamente pequeña de la base del prisma, y llegan en seguida al ojo, siendo conducidos por

la refraccion al interior del prisma. Cuando la gota es de un líquido diáfano, estos rayos solo esperimentan una debilitacion insensible en el corto camino que hacen al través de su sustancia; entonces su brillo impide distinguir la débil luz enviada aun al ojo por la capa líquida infinitamente delgada que comprenden las fuerzas atractivas, y esta es la causa porque desaparece la gota.

El límite seria evidentemente distinto si la sustancia aplicada á la base del prisma fuese opaca, aun cuando tuviese la misma fuerza refringente que el agua; porque entonces, los rayos SI, que tendrian que penetrarla para reflejarse, se hallarian retenidos por su opacidad, y no podrian llegar hasta el ojo. No se empezaria, pues, á ver la reflexion total, hasta el instante en que los rayos SI se reflejasen en el mismo límite de los dos medios, lo cual exige una incidencia interior mas próxima á esta superficie. Aunque la diferencia de grueso que separa este caso de reflexion del anterior es en cierto modo infinitamente pequeña, y por lo mismo enteramente inapreciable á nuestros sentidos, sin embargo, su influencia sobre los ángulos de incidencia y de reflexion es muy notable. Por ejemplo, si la sustancia aplicada al prisma es una gota de cera, la cual se puede hacer alternativamente diáfana ú opaca haciéndola fundir á la llama de una bugía ó dejándola enfriar, se halla que la reflexion total en este último caso empieza en una incidencia á lo menos ocho grados mas próxima á la superficie reflejante que en el primero. Mr. Laplace ha sido el primero que ha indicado esta diferencia de límite de reflexion interior sobre los cuerpos diáfanos ú opacos, y ha presentado el medio de calcular las incidencias en uno y otro caso, segun la teoría de las fuerzas atractivas; y Malus ha comprobado estos resultados por medio de la esperiencia que acabamos de citar, uniendo á ella medidas exactas de ángulos, que prueban que los límites de

incidencia sacados de la observacion coinciden perfectamente con la teoría. Esta conformidad y la constancia de la relacion de refraccion son dos inducciones poderosas en favor del sistema de emision de la luz, sobre todo cuando se consideran los nudos secretos que unen estos dos resultados.

Malus ha practicado aun otra esperiencia, que aunque no es susceptible de medidas, presenta un ejemplo notable del juego de las fuerzas refringentes en el acto de la reflexion total. Ponia en la base de un prisma de crown-glass una gota de tinta líquida, que estando al principio trasparente, permitia la reflexion total bajo ciertas inclinaciones. Pero poco á poco aumentaba la densidad de esta gota por la desecacion, y exigia oblicuidades cada vez mayores, hasta que llegando al fin á ser enteramente opaca, hacia imposible el fenómeno en virtud de la gran fuerza refringente de las partículas metálicas que la componian. Si se hubiese empleado un prisma de un vidrio mas refringente, acaso hubiera sido aun posible la reflexion, y entonces la incidencia á que se hubiera verificado determinaria la relacion de refraccion de la tinta, aunque impermeable á la luz. En general se ve que por este método se puede determinar la relacion de refraccion, aun de los cuerpos opacos, cuando es fácil aplicarlos á la superficie de un prisma diáfano mas refringente que ellos. Pero entonces es preciso tener cuidado de calcular la reflexion total, como si empezase á nacer en la superficie comun al prisma y al cuerpo opaco. Este método ingenioso ha sido indicado y puesto en uso por Mr. Wollaston; pero Malus es quien ha observado la necesidad de calcular de distinto modo los resultados de la esperiencia, segun sea opaco ó trasparente el cuerpo que se aplica, y lo ha hecho por las fórmulas de las dos reflexiones presentadas por Mr. Laplace.

Habiendo dado asi el medio de determinar por esperiencia los poderes refringentes de todos los

cuerpos diáfanos, y aun los de los cuerpos opacos, cuando se les puede poner en contacto con un cuerpo diáfano mas refringente que ellos, es preciso comparar estos resultados observados en diferentes clases de sustancias, á fin de ver si se puede descubrir alguna relacion entre su fuerza refringente y su composicion química. Tal es el objeto de la tabla siguiente formada por Newton.

NATURALEZA DE las sustancias refringentes.	Relacion del seno de incidencia al seno de refraccion en los rayos amarillos... n.		Valores de la cantidad $n^2 - 1$.	Densidad de la sustancia refringente. β	Su poder refringente. $\frac{n^2 - 1}{\beta}$ *
Un falso topacio (sulf. de barita.	23 á	14	1,699	4,27	3979
El aire.	3201 á	3200	0,000625	0,0012	5208
El vidrio de antimonio.	17 á	9	2,568	5,28	4864
Una selenita (sul. de cal).	61 á	41	1,213	2,252	5386
El vidrio comun. . . .	31 á	20	1,4025	2,58	5436
El cristal de roca. . . .	25 á	16	1,445	2,65	5450
El cristal de Islandia. .	5 á	3	1,778	2,72	6536
La sal gemnia (mur. de sosa).	17 á	11	1,388	2,143	6477
El alumbre (sulf. de potasa).	35 á	24	1,1267	1,714	6570
El borax (bor. de sosa).	22 á	15	1,1511	1,714	6716
El nitro (nit. de potasa).	32 á	21	1,345	1,9	7079
El vitriolo de Dantzick (sulf. de hierro). . .	303 á	200	1,295	1,715	7551
El aceite de vitriolo (ácido hidro-sulfúrico).	10 á	7	1,041	1,7	6124
El agua de lluvia. . . .	529 á	396	0,7845	1	7845
La goma arábiga. . . .	31 á	21	1,179	1,375	8574
El espíritu de vino bien rectificado.	100 á	73	0,8765	0,866	10121
El alcanfor.	3 á	2	1,25	0,996	12551
El aceite de olivas. . . .	22 á	15	1,1511	0,913	12607
El aceite de linaza. . .	40 á	27	1,1948	0,932	12819
El espíritu de trementina.	25 á	17	1,1626	0,874	13222
El ambar.	14 á	9	1,42	1,04	12654
El diamante.	100 á	41	4,949	3,4	14556

(*) Todos los números contenidos en esta última columna estan multiplicados por 10000, á fin de evitar las decimales. En la primera he añadido las denominaciones actuales á las que usó Newton. La considerable gravedad de la piedra, que él llama *falso topacio*, indica sin duda ninguna el sulfate de barita.

Fijando la vista sobre esta tabla se ve que sustancias de muy diferentes densidades pueden tener iguales fuerzas refringentes, y que una sustancia menos densa que otra puede tener una fuerza refringente mayor que ella. Asi que, como habiamos ya anunciado, la accion de los cuerpos sobre la luz no depende solo de su densidad, sino tambien de la naturaleza química de sus partículas. Se observa ademas que las sustancias, cuya fuerza refringente es mas enérgica, son en general las resinas y los aceites; y como la del agua destilada apénas es inferior á la de estas sustancias, es natural inferir que debe haber en el agua algun principio inflamable, análogo á aquel de que estan compuestas las resinas y los aceites; y la misma conclusion debe estenderse al diamante, cuya fuerza refringente es aun mucho mas considerable. Estos atrevidos descubrimientos no se pudieron ocultar á la sagacidad de Newton, que no tuvo reparo alguno en indicarlos; porque este grande hombre, que en sus esperiencias observaba la mas escrupulosa severidad y la mayor reserva en sus congeturas, no dudaba nunca para seguir las consecuencias de una verdad tan allá como podian conducirle.

¿Cuál es, pues, este principio comun á los aceites y resinas, que les comunica una accion tan grande sobre la luz? Para descubrirle no hay un medio mejor que el de determinar los poderes refringentes de las sustancias gaseosas; porque estando casi todos los cuerpos de que se trata compuestos de semejantes sustancias combinadas entre sí, se conseguirá de este modo estudiarlos en sus elementos mas generales, que es lo que han hecho MM. Arago y Biot en la memoria citada.

Ya hemos dicho cómo hicieron sus observaciones, y cuáles fueron sus resultados inmediatos: ahora es necesario dar á conocer los poderes refringentes que se deducen de ellos.

Poderes refringentes de los gases á la temperatura o, y bajo la presion 0,76 metros, deducidos del conjunto de las observaciones.

NATURALEZA del gas.	Densidad del gas siendo 1 la del aire.	VALOR DE $n^2 - 1$	Poderes refringentes de los gases siendo 1 el del aire.
Aire atmosférico.	1,00000	0,000589171	1,00000
Oxígeno	1,10359	0,000560204	0,86161
Azoe.	0,96913	0,000590436	1,03408
Hidrógeno. . . .	0,07321	0,000285315	6,61436
Amoniaco	0,59669	0,000762349	2,16851
Acido carbónico.	1,51961	0,000899573	1,00476
Hidrógeno carbonado.	0,57072	0,000703669	2,09270
Hidrógeno mas carbonado que el anterior. . .	0,58825	0,000630300	1,81860
Gas hidroclórico.	1,24740	0,000879066	1,19625

Todas las densidades indicadas en esta tabla son las que resultan de las esperiencias verificadas.

Por ella se ve que la fuerza refringente del gas hidrógeno escede en mucho á la de todos los otros gases, y aun á la de todas las sustancias observadas hasta aqui. Este principio existe en gran abundancia en las resinas, aceites y gomas en que está unido al carbon y al oxígeno; luego él es, sin duda, el que da á estas sustancias la gran fuerza refringente que Newton habia observado. Esta influencia del hidrógeno se ve claramente en el amoniaco, que está compuesto de hidrógeno y azoe, y cuyo poder refringente es doble que el del aire y mayor que el del agua.

Pero pasemos mas allá. Puesto que cada sustancia parece que lleva en sus combinaciones el carácter que le es propio, y aunque conserva hasta

cierto punto el grado de fuerza con que obra sobre la luz, tratemos de calcular bajo este punto de vista la influencia de los principios constituyentes que entran en una mezcla ó en una combinacion dada.

Si tratásemos de descubrir estas relaciones con respecto á cualquiera otra sustancia que la luz, pronto nos veriamos detenidos por obstáculos invencibles producidos por la combinacion y del grado de condensacion de los principios constituyentes; porque aunque la accion química no se ejerce sino á distancias muy pequeñas, estas distancias son sin embargo comparables entre sí, y así la mayor ó menor separacion de las partículas, no puede menos de hacer variar su intensidad. Estas variaciones, modificadas ademas por la figura de las partículas, deben morigerar mucho las relaciones de los compuestos y sus principios; y se ve bien, aunque no puedan calcularse sus efectos, que esta es la razon porque no tienen las mismas propiedades unos que otros. Pero segun las ideas mas verosímiles que podemos formarnos de la luz, esta influencia de la condensacion debe ser mucho menor, en las acciones que los cuerpos ejercen sobre ella, porque la estrema pequeñez de sus partículas, en comparacion de las distancias que separan las moléculas de los cuerpos, debe hacer menos sensibles sobre ellas las pequeñas variaciones que pueda haber en estas distancias. Por lo mismo los poderes refringentes de los cuerpos deben diferir poco de los principios de que se componen, á menos que estos principios hayan sufrido condensaciones muy considerables.

Ahora bien, para determinar cuál debe ser la influencia de cada principio, es necesario saber que el poder refringente de un cuerpo es una cantidad proporcional á la suma de las fuerzas atractivas que ejerce sobre la luz á diferentes distancias, con una densidad igual á I, tomada esta sima desde el momento que la molécula luminosa empieza á ser atraida por el cuerpo de un modo sensible hasta

el instante en que llega á su superficie. Ahora si se supone que la accion propia de cada principio no se altera en su combinacion, se seguirá que en cada distancia tomada entre estos límites, la accion total que sufra la molécula luminosa será la suma de las acciones que ejerzan sobre ella los diferentes principios que componen el cuerpo atrayente; y la parte del efecto que se deba á cada principio será proporcional al producto de su poder refringente propio por su masa, es decir, por la cantidad ponderable de este principio que entra en la combinacion.

Empecemos esperimentando esta ley en casos simples en que haya muy poca ó ninguna condensacion, de lo cual nos ofrecerá un ejemplo el aire atmosférico. Se sabe que este, cuando se halla seco contiene 0, 21 de gas oxígeno en volumen, y el resto es una mezcla de azoe, ácido carbónico, y acaso algunos otros gases en proporciones imperceptibles. Para mayor sencillez consideraremos solo el azoe y el ácido carbónico, suponiendo 0, 784 del primero y 0, 006 del segundo en volumen. Adoptamos estas proporciones porque convienen perfectamente con las analisis del aire atmosférico, y satisfacen igualmente como vamos á ver á los valores de las densidades determinadas por nuestras esperiencias. Ahora bien, para obtener las cantidades ponderables de cada principio que entran en el volumen 1, es necesario multiplicar cada fraccion de este volumen por la densidad del gas á que corresponde, y se tendrá

oxígeno.	0, 210 × 1, 10359 = 0, 231754.
azoe.	0, 784 × 0, 96913 = 0, 759798.
ácido carbónico.	0, 006 × 1, 51901 = 0, 009114.
total.	1, 000666.

Se vé, pues, que esta suma es casi igual á la unidad; y en efecto debe ser asi, pues espresa la gravedad específica de la mezcla, es decir, la del aire

atmosférico que hemos tomado por unidad; y el error que hay es de aquellos que es imposible evitar en las observaciones. Despreciándole, los resultados que acabamos de calcular serán las cantidades ponderables de los tres principios que componen una masa de aire atmosférico, igual á la unidad, y no faltará mas que multiplicar cada una de ellas por el poder refringente que corresponde á su naturaleza, con lo cual se hallará

oxígeno	0, 199682
azoe	0, 785693
ácido carbónico.	0, 009157
poder refringente del compuesto.	0, 994532.

La suma de estos números espresa el poder refringente del aire atmosférico deducido de sus principios constituyentes, el cual deberia ser igual á la unidad para ser perfectamente exacto; el error es, pues, de 0, 005468, ó como unas 5 milésimas del valor total, el cual no produciria tres décimas de segundo á la altura del polo en París, y esta diferencia puede provenir de los errores casi inevitables en las esperiencias, porque dependiendo el resultado anterior de la gravedad específica de los gases, de su pureza y de las refracciones que producen, se halla unido á un gran número de operaciones en que pueden acumularse los errores.

Las muchas y exactas analisis del aire atmosférico que se han hecho en diferentes climas de la tierra y en las circunstancias mas variadas, han hecho ver que sus principios ponderables son los mismos en todas partes, y que existen siempre en las mismas proporciones. Síguese de aqui que el poder refringente del aire atmosférico es tambien el mismo en toda la tierra, puesto que está determinado por los poderes refringentes parciales de sus principios constituyentes; y por consiguiente las tablas de refraccion, calculadas en una latitud cualquiera, pue-

den servir en todos los climas, contando solo con las variaciones de densidad producida por los cambios de presion y de temperatura. En cuanto á las diferencias que pueden depender de la humedad esparcida en la atmósfera, probaremos mas adelante que son sensiblemente nulas, y que es inútil el tener cuenta con ellas.

Consideremos ahora el caso en que los principios constituyentes se hallen unidos entre sí, por medio de una verdadera combinacion: y para proceder gradualmente examinemos lo primero suponiendo afinidades que no sean muy enérgicas. El gas amoniaco nos ofrecerá un ejemplo muy conveniente de esto, por hallarse compuesto de hidrógeno y azoe, á quienes su combinacion no impide conservar el estado gaseoso. Haciendo aqui el mismo cálculo que antes, con arreglo á la analisis del amoniaco hecha por M. Berthollet, la exactitud es tal, que si esta sustancia no hubiese sido analizada, y solo se hubiera conocido la naturaleza de sus principios, su poder refringente hubiera indicado exactamente su composicion.

En fin, pasando á combinaciones mucho mas íntimas, calculemos del mismo modo el poder refringente del agua, segun sus pricipios constituyentes, que son el hidrógeno y el oxígeno. Segun las esperiencias exactísimas hechas por los señores Gay-Lussac y Humboldt, el agua se compone de dos partes de hidrógeno y una de oxígeno, en volumen, lo cual reducido á peso, da en 1000 partes de agua 117 de hidrógeno y 883 de oxígeno. Multiplicada cada una de estas cantidades por el poder refringente que le corresponde, dan la suma 1, 33545 por valor del poder refringente del agua, siendo 1 el del aire atmosférico. El poder refringente observado por Newton, es como $\frac{1}{9}$ de su valor total mas fuerte que este, luego el gas oxígeno y el hidrógeno, condensados en el agua, ejercen sobre la luz una accion mas enérgica que en el estado de simple

mezcla. La misma prueba hecha en otras sustancias sólidas, da resultados semejantes, esto es, que el paso del estado gaseoso al estado sólido, produce siempre un aumento sensible de afinidad; lo cual es notable sobre todo en el diámetro, que segun la esperiencia, tiene un poder refringente muy considerable, cuando la química mas exacta le halla enteramente compuesto de carbon, sustancia que en el estado de gas no ejerce sobre la luz sino una accion muy débil, á lo menos si hemos de juzgar por la del ácido carbónico, de que es un principio constituyente.

Sin embargo, segun estas mismas pruebas, el poder refringente deducido de la composicion química, será muy poco diferente del verdadero, cuando el estado de los cuerpos no sufra sino alteraciones muy débiles. Mr. Biot se ha convencido en efecto, de que puede emplearse con seguridad en la mezcla de los líquidos, aun de los que ejercen una accion notable entre sí, como el agua y el alcohol. Las mezclas de gases hemos visto ya que nos presentan la misma conformidad.

Segun esto, es probable que el poder refringente del agua en estado de vapor, se diferenciará muy poco del del agua líquida, lo cual permite calcular el influjo que puede tener su presencia en las refracciones atmosféricas. Asi se halla que el esceso de fuerza refringente de este vapor sobre la del aire, se halla casi enteramente compensado con su menor densidad, de suerte que la refraccion total producida por una masa de aire seco ó húmedo es sensiblemente la misma, suponiendo iguales la presion y la temperatura. Yo he comprobado esta igualdad por medio de la esperiencia, y la he hallado tan exacta que me ha sido imposible percibir en ella una variacion sensible. De aqui resulta una consecuencia muy importante para los astrónomos, á saber, que sus observaciones son independientes del estado higrométrico del aire, el cual complicaria

muchísimo sus resultados, si tuviese alguna influencia apreciable. Sin embargo, Mr. Arago, por medio de un método de observacion aun mas delicado que el que Mr. Biot habia usado, ha reconocido que el vapor de agua tiene un poder refringente un poco menor que el agua líquida, y ha hallado que hay una diferencia semejante en todos los vapores comparados con los líquidos de que provienen. Por fortuna esta diferencia es tan débil en el agua, que si el rigor obliga á admitirla, la esperiencia permite despreciarla.

Del mismo modo se sabe que el cambio de temperatura no produce alteraciones apreciables en el poder refringente de los gases y del aire; porque las separaciones observadas en verano en una habitacion en que hacia variar artificialmente la humedad y la temperatura, han estado perfectamente conformes con las que indicaba el cálculo, deducidas de los poderes refringentes calculados sobre observaciones hechas en el invierno. Sin embargo, es de presumir que se podrian hallar diferencias en esta parte, si se pudiese obrar en grados de frio tales, que se hiciese sensible la accion recíproca de las moléculas gaseosas por su aproximacion; asi como es posible que en un líquido condensado por el frio, las atracciones que resultan de la configuracion de las partículas modifiquen sensiblemente la accion que ejercen sobre la luz. ¿No podria tal vez atribuirse á esto el curioso fenómeno observado por Mr. Arago, de que la refraccion del agua líquida aumenta al paso que se enfria, aun cuando disminuya su densidad por la dilatacion que sufre bajo los 4°?

Hasta aqui hemos considerado el movimiento de la luz en medios homogéneos; pero pueden concebirse tambien medios compuestos de capas diferentes y de composicion variable, y querer descubrir lo que sucederá á un rayo de luz que los atraviese. Este problema se resuelve por las mismas consideraciones que hemos espuesto al calcular la

marcha de las moléculas luminosas cuando se acercan á las superficies de los cuerpos, y penetran en ellos hasta una pequeña profundidad. Se divide el medio que atraviesa la luz en un número de capas bastante grande para que pueda suponerse constante la densidad ó la composicion de cada una de ellas. Entonces la trayectoría de la molécula luminosa puede considerarse en cada una de estas capas como una parábola, cuya direccion se determina por la intensidad actual de la fuerza refringente; y continuando este cálculo de una en otra capa, se conoce sucesivamente la marcha que cada molécula luminosa puede describir, segun la direccion en que es despedida.

Supongamos un medio semejante ABCD, fig. 71, compuesto de capas orizontales, cuya relacion de refraccion sea constante hasta cierta altura, y desde alli vaya decreciendo poco á poco y de un modo insensible, hasta que al fin venga á ser constante de nuevo, pero menor que antes. Un ejemplo de este medio podrá tenerse si se pone en el fondo del vaso ácido sulfúrico concentrado, y se vierte en seguida sobre el agua pura haciéndola caer poco á poco por una laminita de plomo inclinada para disminuir la rapidez de su caida. Esparciéndose esta agua sobre la superficie del ácido sulfúrico, y teniendo mucha afinidad con él, procura combinarse, y en efecto, la combinacion se verifica en las capas inferiores de agua que reposan inmediatamente sobre el ácido. Pero en virtud de su figura plana, la atraccion que ejercen sobre sí mismas, y al mismo tiempo la gran diferencia de su gravedad específica, las impiden dividirse; y como son siempre las mismas las capas que están en contacto, la combinacion no puede propagarse de una á otra sino con mucha lentitud. Asi es que á pesar de la grande afinidad del agua y el ácido sulfúrico, como no se haga la operacion en un vaso muy ancho, se suele hallar al cabo de un dia que

las capas superiores de agua no han recibido aun ninguna mezcla del ácido. Hé aqui, pues, un medio compuesto de capas paralelas, heterogéneas y de diferentes refracciones, las que disminuyen segun la altura, pues la relacion de refraccion del ácido sulfúrico concentrado es mayor que la del agua pura; é introduce esta propiedad en las capas en cuya combinacion entra. Supongamos ahora que la esperiencia se hace en un vaso rectangular de vidrio delgado, á fin de que las paredes verticales presenten superficies diáfanas paralelas que no alteren la regularidad de la marcha de los rayos de luz. Concibamos despues un punto radiante situado en A, en una de las paredes del vaso, á una altura tal, que las capas de ácido que correspondan á ella no se hallen aun sensiblemente mezcladas con el agua; entonces este punto podrá enviar á traves del ácido un rayo horizontal que atraviese directamente el grueso del vaso, y que podrá ser recibido por el ojo situado al otro lado O. Mas tambien podrá llegar á O otro rayo que saliendo del mismo punto que el primero, se dirija al principio hácia las capas superiores en que el agua se halla mezclada con el ácido sulfúrico; pues encontrando en estas capas un poder refringente cada vez menor, la atraccion de las capas inferiores las llamará continuamente hácia estas; y eligiendo la inclinacion conveniente, esta atraccion podrá llegar hasta doblarle enteramente, y obligarle á reflejarse hácia abajo, de modo que atraviese de nuevo las mismas capas en sentido contrario, y baje hácia el punto O á donde se ha dirigido el primer rayo. Este efecto es enteramente parecido á lo que sucede en el contacto de dos medios de distinta fuerza refringente, sino que en este último caso la reflexion interior se verifica en un espacio muy pequeño, y es rápidamente determinada por la disminucion que sufren las fuerzas atractivas al separarse de la superficie comun, mientras que en la mezcla de agua y ácido,

la disminucion de las fuerzas atractivas es muy lenta por las proporciones graduales de la combinacion. Pero igualmente resulta, que desde el punto O se podrán descubrir, bajo ciertas inclinaciones, dos imágenes del punto radiante, una inferior por una trayectoría directa, y otra superior por una trayectoría curvilínea. Para comprobar estas consecuencias, péguese á una de las paredes del vaso, un poco mas abajo de las capas que se mezclan, una tirita de papel horizontal en que se hayan marcado algunas letras; colocando el ojo al otro lado del vaso á la misma altura con corta diferencia, y tratando de leer estas letras, se verán dos imágenes distintas, una inferior recta, y la otra superior inversa. Este ingenioso método de hacer la esperiencia ha sido inventado por M. Wallaston.

Un fenómeno semejante se percibe colocando en verano el ojo al estremo de una barra de hierro ó de madera pintada de negro, y horizontal, que se halle espuesta al sol, y en cuya prolongacion se hallen objetos pequeños y claros, separados de ella ciento ó doscientos pasos. Los rayos del sol calientan considerablemente esta superficie negra que comunica su temperatura á las capas de aire que están en contacto con ella, se dilatan estas, y adquieren una fuerza elástica suficiente para sostener el peso de las capas superiores con una densidad menor. Luego, como hemos visto, que la relacion de réfraccion del aire depende únicamente de su densidad, las capas que tocan inmediatamente á la barra refractarán la luz con menor energía que las que se hallan sobre ella, y estas á su vez la refractarán menos que las siguientes, hasta que por una degradacion progresiva, pero rápida, se llegue á las capas bastantes separadas de la barra para no sentir la influencia de su temperatura, en cuyo caso la relacion de refraccion se hará constante. Segun esto, se vé que si por un medio semejante se mira horizontalmente á objetos separados y dispuestos en la

direccion de la barra á una altura muy pequeña sobre ella, se podrán ver dos imágenes, una superior y recta por la capa de densidad constante, y otra por las capas de densidad variable, que será inferior é inversa. Esta observacion curiosa se debe tambien á M. Wollaston, asi como otras muchas relativas á este objeto.

El mismo efecto se produce algunas veces mas en grande en las capas de aire contiguas á un suelo árido y arenoso que el sol ha calentado fuertemente. Entonces la densidad del aire va creciendo desde la superficie del suelo hasta cierta distancia ordinariamente muy pequeña, en seguida se hace sensiblemente constante, y en fin va decreciendo con mucha lentitud, conforme á la constitucion habitual de la atmósfera. Si se supone un observador colocado en la capa de densidad media, y mirando á un objeto separado situado igualmente en esta capa, le verá de dos modos; directamente, por medio de la capa de densidad uniforme que los separa, é indirectamente por medio de rayos reflejos en la capa inferior. Estos rayos, dirigidos desde el objeto á la superficie terrestre bajo cierta inclinacion, entran en las capas de menor densidad, se refractan en ellas tomando una direccion mas próxima á la horizontal, se vuelven á elevar, y entrando en las capas superiores cuya densidad les atrae, vienen á parar al ojo del observador. Entonces, pues, percibirá dos imágenes del objeto, una recta por vision directa, y otra inversa por reflexion. Si el objeto se pinta sobre la bóveda celeste, la imágen inversa del cielo rodeará su imágen inversa, absolutamente como cuando los objetos se pintan por reflexion en la superficie del agua.

Tal es la causa de un fenómeno muy curioso que el ejército francés ha tenido ocasion de ver muchas veces en la espedicion de Egipto. El terreno de Egipto inferior es una inmensa llanura perfectamente horizontal, cuya uniformidad se halla solo

interrumpida por algunas eminencias en que se hallan situados los pueblos, para estar á cubierto de las inundaciones del Nilo: la mañana y la noche, el aspecto del pais es el que requiere la disposicion real de los objetos y su distancia; pero luego que la presencia del sol ha calentado la superficie del suelo, el terreno se presenta reanimado á cierta distancia por una inundacion general, y los pueblos que se hallan á una distancia mayor parecen islas situadas en medio de un gran lago; y bajo cada uno de ellos se ve su imágen inversa, como se vería efectivamente en el agua. Al paso que se acerca á un pueblo, se separan los límites de esta incidencia aparente, se retira el lago imaginario que parecia rodear al pueblo, y en fin, desaparece enteramente, reproduciéndose la ilusion con respecto á otro pueblo mas distante. Asi, como observa Mr. Monge, de quien he tomado esta descripcion, todo concurre á completar la ilusion, que algunas veces es muy cruel, sobre todo en el desierto, pues presenta en vano la imágen del agua cuando mas necesidad se tiene de ella.

Lo mismo se observa con corta diferencia en el mar en los movimientos de gran calma. Un barco visto á lo lejos en el horizonte presenta á veces dos imágenes, una directa y otra inversa, absolutamente semejante á la otra, muchas veces de igual intensidad, y en una palabra, perfectamente semejante al efecto de la reflexion en un espejo. Como este fenómeno nace de la diferencia de temperatura del agua y del aire, se manifiesta ordinariamente en los cambios repentinos de temperatura, no permitiendo la densidad del agua que su superficie sufra estas variaciones con tanta rapidez como el aire. Pero como la temperatura del agua y la evaporacion que se verifica continuamente en su superficie se opone á que adquiera una temperatura tan elevada como un terreno árido y arenoso, de aqui es que este fenómeno se manifiesta mas rara vez en el mar,

y dura menos que en Egipto, donde es diario, y en algunas llanuras arenosas, donde se reproducen las mismas circunstancias casi todos los dias al llegar el sol a la misma altura.

MM. Mathien y Biot han observado en Dunkerque, á la orilla del mar, un gran número de fenómenos de esta especie, y este último en una memoria que presentó al Instituto en 1809 demostró que las trayectorías consecutivas que parten del ojo del observador se cortan en sus segundos ramos de modo que forman una curva cáustica, bajo la cual no puede verse ningun punto. En la fig. 72, la curva LT representa esta cáustica, y DMS es la trayectoría que forma el límite, tirada desde el ojo del observador y tangente al suelo. Todos los puntos situados sobre esta trayectoría no pueden enviar al observador mas que una sola imágen; los que se hallan en el espacio SLT le envian dos, una superior recta, y otra inferior inversa; y en fin, los puntos situados mas abajo de la cáustica no pueden enviarle ninguna, y se hacen invisibles; de suerte que un objeto móvil, un hombre, por ejemplo, que se separe á diferentes distancias, presenta sucesivamente las diversas apariencias que manifiesta la fig. 73.

La teoría y la esperiencia prueban igualmente que para producirse estas apariencias no hay necesidad de una gran diferencia de temperatura, bastando que haya la de uno ó dos grados del termómetro centesimal, cuando la observacion se hace sobre un suelo unido y estenso que permite á los rayos de luz prolongarse sin ningun obstáculo, y manifestar la curvatura de la trayectoría que describen. Tal fue el sitio que MM. Mathien y Biot eligieron en Dunkerque en una playa arenosa, situada en las Dunas, cerca del fuerte de Risban: y favorecia aun á sus observaciones la existencia de un gran número de objetos muy distantes, como campanarios, árboles, cabañas &c., que elevándo-

se en esta playa árida como otras tantas señales, manifestaban la marcha de los rayos por las apariencias que presentaban. Asi el fenómeno de duplicacion y de inversion de las imágenes era sensible casi todos los dias, y con diferencias de temperatura que no escedian de dos grados del termómetro centesimal.

Sucede tambien algunas veces que los objetos distantes parece que están suspensos en el aire, y entonces su imágen es simple, recta, y en la apariencia no se halla acompañada de ninguna imágen inversa. A este fenómeno se ha dado el nombre de *suspension*. En la memoria citada Mr. Biot hizo ver que aun en esta circunstancia la segunda imágen inversa existe tambien, pero infinitamente debilitada, y por lo mismo no se percibe mas que la imágen directa, colocada sobre la imágen inversa del cielo.

Cuando la vision se verifica de este modo por medio de trayectorías convexas hácia la tierra ó el mar, la refraccion es negativa, y el horizonte aparente está mucho mas bajo de lo que deberia ser con respecto á la altura á que se observa. Los marinos deben, pues, desconfiar de este fenómeno, que podria inducirles á errores considerables acerca de las latitudes, pues se ha hallado por esperiencia que estos errores pueden llegar muchas veces hasta cuatro ó cinco minutos. El horizonte aparente se hallará, pues, mas bajo de lo que es en realidad, cuando el mar esté mas caliente que el aire, y por el contrario, si está mas frio, verificándose la disminucion de las densidades de abajo arriba, como ordinariamente sucede; pero con mucha mas rapidez el horizonte se eleva á una altura muy considerable. Estos errores se evitarían no observando las alturas de los astros sobre el horizonte del mar, sino sobre un horizonte artificial, colocado fuera de las capas inferiores en que se verifica la variacion estraordinaria de densidad; pero este medio no es siempre fácil, y á bordo de los navíos es enteramen-

te impracticable, á cuasa del movimiento del mar. En este caso podrá corregirse el error abrazando, si es posible, la distancia de los dos horizontes opuestos del mar; el esceso de esta suma sobre dos ángulos rectos dará el duplo de la depresion aparente del horizonte, que será necesario emplear en el cálculo, y se conocerá esta digresion tomando la mitad del resultado. Por desgracia esta observacion de los dos horizontes, indicada por M. Wallaston, parece muy dificil de obtener con exactitud; pero ya que no está en nuestras manos corregir el error que se produce en estas circuntancias, á lo menos es útil conocer su existencia, y el sentido en que puede obrar, para desconfiar de él.

CAPITULO IV.

De la doble refraccion.

Ya hemos indicado que los rayos de luz, al atravesar la mayor parte de los cuerpos cristalizados, se dividen generalmente en dos hacecillos, uno de los cuales, llamado *hacecillo ordinario*, sigue la ley general de refraccion descubierta por Descartes, y el otro, llamado *hacecillo estraordinario*, está sujeto á muy distintas leyes.

Este fenómeno se verifica en todos los cristales transparentes, cuya forma primitiva no es un cubo ni un octaedro regular. La division del rayo es mas ó menos fuerte, segun la naturaleza del cristal y el sentido en que está cortado; pero de todas las sustancias conocidas, la que produce este fenómeno del modo mas enérgico es el carbonate de cal romboidal, llamado vulgarmente *Espato de Islandia;* y como se encuentra frecuentemente en el comercio y en las colecciones de los naturalistas, será la primera que empleemos para reconocer y determinar la marcha de los rayos.

Los cristales de esta sustancia presentan como

indica su nombre, la forma de un romboide, fig. 74, que tiene seis ángulos sólidos agudos, y dos obtusos; estos últimos están formados por tres ángulos planos iguales tambien inclinados, y en los ángulos diedros agudos la inclinacion de las caras es de 74° 55′, y por consiguiente de 105° 5′ en los otros. Malus ha medido estas inclinaciones por la reflexion de la luz. Mr. Wollaston habia obtenido tambien el mismo resultado.

Si se coloca un romboide semejante sobre los caractéres de un libro impreso, ó sobre un papel en que se hayan trazado líneas y puntos, y se mira al traves de su grueso, todo parece doble, de suerte que cualquier punto radiante colocado debajo del cristal envia dos imágenes al ojo, y por consiguiente hace llegar á él dos rayos. Esto indica que cada rayo simple se divide en dos hacecillos al atravesar el romboide; y en efecto es lo que se puede comprobar rompiendo de este modo un rayo de luz solar dirigido por un heliostato, porque entonces se obtienen dos rayos emergentes distintos. Ahora bien, para medir la separacion de estos rayos, y determinar su marcha, Malus ha indicado un medio muy sencillo: trácese con tinta bien negra sobre el papel en que se ha de colocar el romboide un triángulo rectángulo ABC, fig. 75, cuyo lado pequeño BC sea, por ejemplo, un décimo de AC. Mirando el triángulo por el romboide, se verá doble, de cualquier modo que se coloque el ojo, y respecto á cada posicion se hallará un punto F, en que la línea A′C′, imágen estraordinaria de AC, cortará la línea AB que suponemos que pertenece á la imágen ordinaria. Tómese, pues, sobre el mismo triángulo una longitud AF′, igual á A′F, y el punto F′ será aquel cuya imágen estraordinaria coincida con la imágen ordinaria del punto F. El rayo ordinario que sale de F y el estraordinario que sale de F′ se confunden despues de su salida, y no dan mas que un solo rayo emergente, que se

dirige hácia el ojo; y recíprocamente un rayo natural que partiese en esta última direccion desde el sitio donde está el ojo hácia el cristal, se refractaria en él en dos hacecillos, uno de los cuales iria á parar al punto F, y el otro al punto F′ del triángulo trazado bajo la base del romboide, como en efecto puede comprobarse por medio de esperiencias directas hechas con el heliostato. Segun esto, si se dividen líneas AB AC, por ejemplo, en mil partes iguales, cada una, con los números de las divisiones marcados de 10 en 10, la sola inspeccion de estos números indican siempre cuales son los puntos de AB y AC, cuyas imágenes ordinarias y estraordinarias coinciden; por consiguiente, si se conoce la posicion de estas líneas y la del triángulo, con relacion á las aristas de la base del romboide, se sabrá á qué parte de la base corresponde el punto F, y á cuál otra el punto F′. Asi que para construir los rayos refractos solo faltará determinar en la superficie superior su punto comun de emergencia. Esto se conseguirá buscando y marcando en esta superficie el punto I, fig. 76, en que se cruzan las imágenes de los dos lados del triángulo que sirve de mira; pero como es conveniente conocer tambien la direccion del rayo emergente que resulta, es mejor hacer la observacion con un círculo graduado, cuyo limbo se mantiene vertical, y colocado en el plano de emergencia IOV. Se dirige el anteojo de este círculo al punto de emergencia I en que se cruzan aquellas imágenes; y habiendo tenido cuidado de póner bien horizontal la base del romboide, esta sola observacion determina á un mismo tiempo el ángulo de emergencia IOV ó NIO contado desde la normal, y la posicion del punto de emergencia I en el romboide. De este modo se conoce tambien á *priori* la posicion de los dos puntos F, F′, cuyas imágenes coinciden, y por consiguiente se podrá marcar la direccion de los rayos refractos ordinario y estraordinario FI, F′I, que

corresponden á la direccion observada del rayo emergente; sobre lo cual es preciso observar que en muchos casos el rayo F'I que sufre la refraccion estraordinaria no se halla comprendido en la prolongacion del rayo de emergencia NIO. Tal es el medio que ha empleado Malus; y adoptándole podemos admitir todas sus observaciones, y mirarlas como condiciones que es necesario cumplir.

Entre las varias posiciones que pueden darse al romboide sobre el plano hay una sobre todas que merece observarse; porque entonces la refraccion estraordinaria se verifica como la ordinaria en el mismo plano de emergencia. Para descubrir cuál es esta posicion es necesario suponer que por uno de los lados del triángulo dividido ABC, por ejemplo BC, pasa un plano perpendicular á las superficies superior é inferior del romboide; colocar el ojo en este plano, y hacer girar poco á poco el cristal sobre su base, hasta que se sobrepongan las dos imágenes de la línea recta BC; en este caso, sabiendo que la imágen ordinaria se halla siempre en el plano de emergencia, es claro que lo está tambien la estraordinaria que coincide con ella. Esto sucede cuando la recta BC, que sirve de mira, divide en dos partes iguales uno de los ángulos planos obtusos del romboide, ó es paralela á la línea que produce esta division. Entonces es nula la separacion de ambas imágenes, perpendicularmente al plano de incidencia; y por consiguiente, cualesquiera que sean las fuerzas que produzcan la refraccion estraordinaria, es seguro que su resultante se halla comprendido en este plano. Por lo mismo se le ha dado un nombre particular, llamándole *seccion principal del romboide*. Suponiendo que el cristal con que se hacen las esperiencias tenga exactamente la forma primitiva que conviene al carbonate de cal, las bases del romboide serán rombos perfectos, y la seccion principal contendrá las dos diagonales tiradas en ambas bases por los vértices de los ángulos ob-

tusos. El plano de esta seccion cortará, pues, el romboide, formando un paralelogramo AB, A′ B′, fig. 77, en que los lados AB, A′ B′ son las mismas diagonales, y AB′, A′ B las aristas del romboide que las unen. La línea A A′, tirada por los dos ángulos sólidos obtusos A A′, se llama *eje del cristal*, y se halla igualmente inclinada sobre cada cara, formando con todas ellas un ángulo de 45°, 23′, 55″; y á este se refieren todos los fenómenos de la refraccion estraordinaria.

Examinemos primeramente cómo se verifica esta refraccion en el plano de la seccion principal. Todos sus fenómenos generales se ven en la fig. 28, en que SI representa el rayo incidente, IO el rayo refracto ordinario, é IE el rayo refracto estraordinario. IN es la direccion de la normal al punto de incidencia. Cuando esta es perpendicular, el rayo ordinario se confunde con la prolongacion de la normal, y atraviesa el cristal sin refractarse; pero el rayo estraordinario se quiebra en el punto de incidencia, y se separa mas ó menos hácia el ángulo sólido menor B.′ Este efecto es general en todas las incidencias, como representa la figura, y determina siempre la situacion del rayo estraordinario con relacion al otro.

La consecuencia que debemos inferir de aqui es que existe en el cristal una fuerza particular, que quita al rayo ordinario parte de sus moléculas, y las rechaza hácia B′. Pero ¿cuál es esta fuerza? Pronto veremos que nace del mismo eje del cristal, es decir, que si por cada punto de incidencia se tira una línea IA′ paralela á este eje, y que represente su posicion en las primeras capas en que se divide el rayo, todos los fenómenos se verifican como si emanase de esta línea una fuerza *repulsiva* que obrase solo sobre cierto número de partículas de luz, dirigiéndose á separarlas de su direccion. Esta fuerza repele siempre los rayos hácia B′, porque siempre se hallan á este lado del eje, cualquiera que sea

la incidencia con que entren en el cristal.

Sigamos esta idea, que no repugna á las pocas observaciones que hemos hecho; y para comprobarla con una prueba directa, cortemos el cristal con dos planos perpendiculares á su eje, fig. 79, de modo que se formen dos nuevas caras *a b c*, *a′ b′ c′* paralelas entre sí. Ahora bien, si dirigimos un rayo de luz S I, perpendicular á estas caras, penetrará sus capas paralelamente al eje del cristal primitivo. Asi, suponiendo que la fuerza repulsiva emane de este eje, será nula en este caso, y el rayo no deberá dividirse, que es lo que sucede en efecto.

Se halla tambien, haciendo la esperiencia, que la imágen se presenta sencilla cuando la segunda superficie de la placa está inclinada sobre el eje, siendo la primera perpendicular á este y al rayo incidente. Esto sucederia si no se quitase mas que el primer ángulo sólido A del romboide primitivo. El rayo incidente I continuaria su marcha paralelamente al eje, como en el caso anterior, y al salir por la segunda superficie se refractaria en el aire en una sola direccion siguiendo la ley de la refracion ordinaria, es decir, segun la relacion constante de los senos. De aqui debe inferirse que recíprocamente un rayo incidente R′ I′, que pasase con el mismo ángulo de incidencia desde el aire á un prisma semejante, se refractaria en él en un solo rayo paralelamente al eje, y saldria por I del mismo modo. Asi lo comprueba efectivamente la esperiencia. Si habiendo cortado un prisma semejante se pone el ojo junto á la superficie perpendicular al eje, de modo que solo se reciban los rayos que lleguen en esta direccion, todas las imágenes de los objetos esteriores son sencillas, y solo sufren hácia los bordes la difusion que hemos indicado, y que corresponde al fenómeno general de la descomposicion de la luz por los prismas.

Pero si la fuerza repulsiva que produce la refraccion estraordinaria emana en realidad del eje,

como parece que indican los fenómenos, no puede ser nula sino cuando el rayo refracto es paralelo á ella. El corte que hemos determinado antes es, pues, el único en que un prisma cristalizado pueda dar imágenes sencillas, como lo confirma la esperiencia; y esto nos da un medio para reconocer el eje de los cristales.

Volvamos á considerar nuestro cristal de caras paralelas, cortadas perpendicularmente al eje. Hemos visto que en él no se divide el rayo bajo una incidencia perpendicular; pero bajo las incidencias oblícuas deberá dividirse, pues entonces forma ya cierto ángulo con el eje de que dimana la fuerza repulsiva. En efecto, asi se verifica; y ademas, á igual incidencia, la refraccion estraordinaria es la misma todo al rededor del eje; lo cual nos manifiesta que la fuerza repulsiva, naciendo del eje, obra igualmente hácia todas partes.

En todos los cristales que producen la doble refraccion existe una direccion que da fenómenos semejantes, es decir, que los rayos que atraviesan el cristal en este sentido no se dividen, aun cuando salgan por una superficie prismática. Debemos, pues, por analogía, dar á esta direccion el nombre de *eje de la refraccion estraordinaria.* En efecto, la fuerza que divide los rayos emana siempre de este eje, pero no siempre es repulsiva. Yo he descubierto que hay cristales en los que el rayo estraordinario es atraido hácia el eje en lugar de ser rechazado. Este hecho exige que dividamos los cristales que producen la doble refraccion en dos clases: cristales de *doble refraccion atractiva y de doble refraccion repulsiva.*

Si en un cristal de cualquiera de estas clases se corta en una direccion arbitraria una lámina de superficies paralelas, se hallará que en esta hay tambien una seccion en que las dos refracciones no salen del plano de incidencia; y en este caso, como en el romboide de espato de Islandia, esta seccion es la

formada por el eje del cristal y perpendicularmente á las dos superficies. Generalizando esta idea, se llama *seccion principal de una superficie cualquiera* el plano que pasa por el eje del cristal perpendicularmente á esta superficie.

Reconocidas de este modo las circunstancias generales de esta especie de accion, es necesario medir sus efectos y tratar de descubrir sus leyes. Para esto no hay otro medio sino el de cortar láminas en diferentes sentidos con respecto al eje, observar en ellas las refracciones estraordinarias bajo diferentes incidencias, buscar las leyes particulares que siguen, y tratar de reunirlas todas en una sola ley general, que es lo que Huyghens ha hecho con el espato de Islandia. La ley esperimental que él dedujo ha sido despues comprobada por Mr. Wollaston y en seguida por Malus por medio de esperiencias directas que confirman su exactitud. Traduciéndola al lenguage analítico se han obtenido fórmulas que ofrece el medio de poder calcular, respecto á una superficie cualquiera natural ó artificial, la direccion de los rayos ordinario y estraordinario que nacen de cada rayo incidente dado; y es digno de notar que esta ley, determinada por la observacion de un solo cristal, se ha hallado que es aplicable á todos los cristales, tanto atractivos como repulsivos, sin otra modificacion que un simple cambio en la constante. En fin, admitiéndola como exacta, Mr. Laplace ha llegado por medio del cálculo hasta las relaciones de velocidad que indica entre el rayo ordinario y el estraordinario. De estas fórmulas resulta que la velocidad del rayo estraordinario es en general mayor que la del ordinario en los cristales de doble refraccion atractiva, y menor en los de doble refraccion repulsiva. La relacion absoluta de estas dos velocidades no depende esclusivamente de las superficies naturales ó artificiales por donde los rayos penetran en el cristal, sino de los ángulos que forman con su eje despues de la refraccion. Si el

rayo estraordinario coincide con el eje, la influencia de las fuerzas que producen la doble refraccion es nula con respecto á él, y se mueve con la misma velocidad que el rayo ordinario. Pero si su direccion es distinta de la del eje, su velocidad se acelera cuando el cristal es atractivo, y se retarda cuando es repulsivo: estas variaciones van creciendo á medida que aumenta el ángulo del rayo con el eje, y llegan á su máximo cuando este ángulo es recto. Pero estos cambios no tienen ninguna influencia sobre el rayo ordinario, que se refracta invariablemente segun la ley de Descartes, y siempre en la prolongacion de su plano de incidencia, en vez de que el rayo estraordinario se separa de este plano á uno ú otro lado cuando la accion de las fuerzas emanadas del eje conspira á hacerle salir de él, permaneciendo solamente en este plano cuando la incidencia se verifica en la seccion principal de esta superficie; porque conteniendo esta al eje, la fuerza que produce la refraccion estraordinaria obra tambien en el mismo plano.

Para empezar por un ejemplo sencillo, consideremos un cristal tallado en forma de paralelipípedo rectángulo, en el que una de las aristas AA′, fig. 80, esté en la misma direccion que el eje del cristal, y midamos las dos refracciones en los dos sentidos rectangulares AB, AA′, haciendo primeramente el plano de incidencia perpendicular, y despues paralelo al eje AA.′ Esto se puede conseguir por medio del aparato de Malus, esplicado antes, y por otros diferentes métodos análogos que es fácil imaginar. Esto supuesto, he aqui los resultados que da la esperiencia.

En la primera posicion, en que la incidencia se verifica en el plano AB*ab*, los dos rayos refractos, ordinario y estraordinario, no salen de este plano, refractándose uno y otro en él, segun la ley de Descartes; de modo que el seno de refraccion y el de incidencia, contados desde la normal IN, estan

entre sí en una relacion constante; pero esta relacion no es la misma con respecto á las dos refracciones; pues en el espato de Islandia, por ejemplo, y en todos los cristales de fuerza repulsiva con igual incidencia, el rayo ordinario se halla mas próximo á la normal que el estraordinario, como manifiesta la fig. 81, en que está representada aparte la refraccion en la superficie AB*ab*. Lo contrario sucede en los cristales de doble refraccion atractiva, fig. 82, en los cuales el rayo estraordinario se halla mas refracto y mas próximo á la normal que el otro.

Este resultado puede deducirse de la separacion que sufren los dos hacecillos refractos al atravesar el cristal en la direccion que acabamos de suponer; pero vale mas comprobarle desde luego por la consecuencia que se deriva de él inmediatamente, á saber, que si la refraccion estraordinaria en esta direccion se halla verdaderamente sujeta á una relacion constante entre los senos, se puede determinar esta constancia como la de la refraccion ordinaria, cortando un prisma ABD, A′B′D′, fig. 83, cuyas aristas sean paralelas al eje, y observando la separacion que produce entre las dos imágenes. Ademas, puesto que la direccion del corte es indiferente respecto á la refraccion ordinaria, se ve que este mismo prisma podrá servir para comprobar la constancia de ambas relaciones; pues esta quedará demostrada tanto respecto á una como á otra, si en todas las incidencias se encuentra de un mismo valor. Este resultado, digno de atencion, es comun á todos los cristales que se han observado hasta aqui.

Aplicándole al espato de Islandia ha hallado Malus que si el seno de incidencia, tomado desde la normal, se representa por 1, el seno de la refraccion ordinaria es 0,6044871, y el seno de la refraccion estraordinaria 0,6741717: se ve, pues, que esta última refraccion produce una separacion menor que la primera, como hemos dicho que se verificaba en todos los cristales de doble refraccion

repulsiva en la direccion de corte é incidencia que hemos supuesto; y este resultado se une muy bien á la idea de una fuerza repulsiva emanada del eje; porque en el caso de nuestra observacion, el rayo refracto estraordinariamente permanece perpendicular á este eje en toda su marcha por dentro del cristal; y por esto la fuerza repulsiva, emanada del eje, no tiene tendencia alguna á separarle del plano de incidencia; no hace mas que oponerse al movimiento de las partículas de luz, y retardar su velocidad al paso que empiezan á penetrar el cristal. Su accion en este sentido es, pues, directamente opuesta á la de las fuerzas atractivas ordinarias que tienden á acelerar la velocidad de las moléculas. Asi, el efecto que resulta de ellas sobre estas partículas debe ser el mismo que si se disminuyese la fuerza refringente del cristal, es decir, que debe ser menor la separacion que sufra el rayo, como lo manifiesta la observacion. Por el contrario, en los cristales atractivos, la fuerza atractiva emanada del eje se une á la fuerza refringente del medio para acrecer la velocidad de las partículas luminosas, y aumenta su separacion; de suerte que el rayo estraordinario se acerca á la normal mas que el ordinario.

Volvamos ahora á tomar nuestra lámina rectangular, fig. 80, y coloquemos el plano de incidencia en la superficie AA′, *aa.′* La fuerza emanada del eje AA′ obra tambien en este plano, y por lo mismo no conspira á hacer salir de él el rayo estraordinario, asi que se ve que se halla en efecto comprendido en él. Ademas, es fácil preveer si se hallará mas ó menos desviado que el rayo ordinario; porque si nos figuramos aparte la seccion de nuestro cristal por el nuevo plano de incidencia, fig. 84 y 85, siendo AA′ el eje, SI el rayo incidente y OI el rayo ordinario, se ve que la fuerza emanada del eje conspirará á aumentar el ángulo AIO si el cristal es repulsivo, fig. 84, y á dismi-

nuirle si es atractivo, fig. 85; de suerte que el rayo estraordinario I E deberá acercarse á la normal mas que el otro en el primer caso, y menos en el segundo; lo cual es conforme á la observacion.

Para fijar las ideas, pondremos aqui los valores de las dos relaciones de refraccion respecto á diferentes cristales con la indicacion de la naturaleza de la fuerza; pero es preciso tener presente que estas relaciones estan observadas conforme á las indicaciones anteriores, es decir, estando la superficie y el plano de incidencia, una paralela y otro perpendicular al eje del cristal.

DESIGNACION de las SUSTANCIAS.	Relacion del seno de refraccion al seno de incidencia. Ordinario.	Estraordinario.	Naturaleza de la doble refraccion.	DIRECCION del EJE.
Espato de Islandia.	0,604187	0,674172	repulsiva.	Paralelo á la pequeña diagonal del romboide primitivo.
Aragonita.............	0,590620	0,651550	repulsiva.	Paralelo á las agujas.
Quarzo.................	0,645813	0,641776	atractiva.	Paralelo á las agujas.
Sulfate de barita....	0,611530	0,607223	atractiva.	Paralelo á la pequeña diagonal de la base de los prismas.
Fosfate de cal........	....	....	repulsiva.	
Berilo..................	....	....	repulsiva.	Paralelo á las aristas de los prismas.
Turmalina.............	....	....	repulsiva.	Paralelo á las agujas.
Topacio................	....	....	atractiva.	Paralelo á las agujas.
Sulfate de cal........	0,645813	0,641776	atractiva.	En el plano de las laminas.

Todos los cristales designados en esta tabla tienen un solo eje, del cual emanan las fuerzas atractivas ó repulsivas; pero tambien pueden suponerse

fuerzas emanadas de muchos ejes. Asi sucede en la mica, en que he descubierto que existen dos ejes repulsivos, uno situado en el plano de las láminas, y otro perpendicular á este plano. Desgraciadamente los cristales diáfanos de esta sustancia no son bastante gruesos ni comunes para poder estudiar en ellos la marcha de los rayos; y no he podido reconocer la existencia de los dos ejes sino por otro método de observacion, de que hablaré despues. Este ejemplo es hasta ahora el único en que se ha encontrado mas de un eje. En todos los demas, en que solo existe uno, parece que siempre se ha hallado aplicable la ley de Huyghens.

De la reflexion en la segunda superficie de los cristales.

La teoría que acabamos de esplicar no se limita á los rayos refractados estraordinariamente por los cristales, sino que se aplica igualmente á los que se reflejan en su segunda superficie. Mas antes de entrar en el pormenor de las consecuencias que indica, es preciso establecer por medio de la esperiencia los principales caractéres de esta especie de fenómenos.

Cuando un rayo de luz cae sobre la primera superficie de un cristal, saliendo del vacío ó de cualquier otro medio no cristalizado, se refleja parcialmente en un solo hacecillo, de modo que el ángulo de reflexion, tomado desde la normal, es igual al ángulo de incidencia. La fuerza atractiva ó repulsiva que emana del eje del cristal no tiene absolutamente ninguna influencia sobre este fenómeno, pues se puede volver el cristal sobre su plano en todas las direcciones posibles, sin que se altere la intensidad ni la direccion del rayo reflejo. Pero no sucede asi en la reflexion interior que se verifica en la segunda superficie del cristal; pues cada rayo, al reflejarse sobre esta superficie, se divide general-

mente en dos hacecillos, que vuelven á entrar en el cristal, sufriendo uno la refraccion ordinaria y otro la estraordinaria.

Para concebir la causa de esta division es necesario saber que los rayos refractados, ya ordinaria, ya estraordinariamente, por un cristal, luego que han penetrado en su interior á una profundidad sensible, han adquirido cierta colocacion de sus partículas, tal, que continuando su marcha por este mismo cristal no pueden ya dividirse; y la esperiencia prueba que tampoco se dividirian atravesando un segundo cristal contiguo al primero que tuviese su seccion principal colocada en la prolongacion de la de aquel. Esta especie particular de colocacion es lo que Malus ha llamado *polarizacion* de la luz, la cual estableceremos en breve por medio de la esperiencia, limitándonos en este momento á anunciarla como un hecho. Ahora bien, cuando las moléculas que componen un mismo rayo refracto, ya ordinario, ya estraordinario, se acercan á la segunda superficie de un cristal á una distancia tal, que puedan sentir el efecto de las fuerzas reflejantes que nacen de ella, sucede generalmente que cierto número de moléculas son despedidas por estas fuerzas en diferentes direcciones de las que la refraccion les habia dado; de suerte, que volviendo á entrar en el cristal por efecto de la reflexion total ó parcial, vuelven de nuevo á ser susceptibles de dividirse en las dos refracciones ordinaria y estraordinaria. Hemos dicho que esto se verifica generalmente, porque hay ciertas posiciones particulares en que las fuerzas reflejantes no alteran la disposicion comunicada primitivamente por la refraccion á las moléculas luminosas; y entonces el rayo se refleja sin dividirse, ó se sustrae enteramente á la reflexion. Mas adelante examinaremos detenidamente todas estas particularidades; pero aqui podemos prescindir de ellas, pues solo influyen en la intensidad del hacecillo reflejo, y no en la direc-

cion que toma al reflejarse. Un rayo que se refleja unido, ó que sale del cristal sin reflejarse, sufriria la doble reflexion si las moléculas que le componen estuviesen dispuestas de otro modo; y por tanto, lo primero que debemos determinar siempre es la direccion de la reflexion.

Ahora bien; esta puede determinarse por medio de esta observacion: que el rayo reflejo, al volver á entrar en el cristal, obra como si fuese un rayo que viniese de afuera. Sea I′, fig. 86, el punto de incidencia interior, y O′I′ el rayo incidente: si ha sufrido la refraccion ordinaria, constrúyase el rayo reflejo ordinario I′O″ que forme el ángulo de reflexion igual al de incidencia, al otro lado de la normal I′N′; y despues calcúlese por las fórmulas de la teoría la direccion del rayo estraordinario I′E″ que le corresponde partiendo del punto de reflexion I′, es decir, como si hubiese provenido de un rayo esterior, y asi se tendrán los dos rayos reflejos que resultan de la division del rayo incidente O′I′ despues de la reflexion. Por el contrario: si este rayo es estraordinario, fig. 87, condúzcasele hasta el punto de incidencia I′; calcúlese despues por las fórmulas teóricas el rayo ordinario I′O′ que le corresponde al mismo lado de la normal, y conocido este, procédase como antes; con lo que se tendrán los dos rayos reflejos I′O″, I′E″, en que se dividirá el rayo dado. Generalmente puede asegurarse que un rayo ordinario y otro estraordinario, que van juntos en su incidencia interior, van juntos tambien despues de la reflexion.

Estas son las leyes generales de la reflexion en el interior de los cuerpos cristalizados, ya se refleje interiormente solo una parte de las moléculas luminosas y el resto se refracte hácia afuera, ya por ser mas fuerte la atraccion interior sean rechazadas hácia adentro todas las partículas incidentes por las fuerzas que produce la refraccion.

Aqui, como en la refraccion ordinaria, la inci-

dencia á que empieza á producirse esta reflexion total depende de la naturaleza del cristal mas ó menos refringente y de la del medio esterior; pero no podemos calcular su límite por teoría, porque ignoramos cómo varía junto á su superficie la fuerza atractiva ó repulsiva que emana del eje del cristal. Es preciso, pues, recurrir á la esperiencia, y determinar el principio de la reflexion total por la imposibilidad de obtener un rayo emergente.

Paso de la luz al través de muchos cuerpos contiguos que producen la doble refraccion.

Todas las esperiencias anteriores se suponen hechas en el vacío ó en el aire, cuya accion propia sobre la luz es tan débil, que puede despreciarse. Pero ahora es preciso examinar lo que sucederá cuando los rayos de luz que penetran en un cristal que produce la doble refraccion, salen, no del vacío, sino de un medio material que produzca la refraccion doble ó sencilla.

Empecemos por este último caso, por ser el menos complicado, y sea A B, fig. 88, la superficie comun del medio y el cristal, y SI el rayo incidente. Calcúlese ó constrúyase conforme á la teoría el rayo refracto ordinario IO que resulta de él segun las relaciones ordinarias de refraccion de las dos sustancias, y como si el segundo medio no estuviese cristalizado. Despues, conociendo el rayo refracto IO, búsquese por las fórmulas el rayo estraordinario IE que le corresponde, el cual depende absolutamente de la posicion de IO con respecto al eje del cristal; los dos rayos IO, IE serán en los que se resolverá el rayo incidente SI.

Ahora bien; si el primer medio está tambien cristalizado, el rayo incidente dado SI podrá sufrir en este medio la refraccion ordinaria ó la estraordinaria. En el primer caso se puede proceder lo mismo que antes, empleando la relacion de refraccion

ordinaria del primer medio, y acabando el cálculo como si no estuviese cristalizado. Pero si el rayo dado SI sufre tambien la refraccion estraordinaria, fig. 89, es preciso empezar, calculando en el primer medio por las fórmulas teóricas, la direccion del rayo ordinario S'I que le corresponde. Conocido este, se procede como antes para calcular los dos rayos IO, IE que resultan de él en el segundo cristal.

Se ve por esta analisis, que esceptuando los casos de escepcion que resultan de una gran fuerza atractiva del primer medio, estas construcciones dan siempre en el segundo cristal dos rayos, uno ordinario y otro estraordinario; sin embargo, la esperiencia parece que contradice este resultado, á lo menos cuando siendo el primer medio cristalizado, produce la doble refraccion. Entonces la subdivision de los rayos que salen de él, asi como la especie de refraccion ordinaria ó estraordinaria que sufren, depende de la posicion de la seccion principal del segundo cristal con respecto á la del primero. Si estas secciones son paralelas, cada rayo ordinario ó estraordinario del primer cristal permanece sencillo al pasar al segundo, y toma en él la misma especie de refraccion que ha sufrido en el primero; si las secciones son perpendiculares entre sí, cada rayo del primer cristal permanece igualmente sencillo; pero muda de refraccion, haciéndose esta estraordinaria en el ségundo cristal si era ordinaria en el primero, y recíprocamente. Entre estos dos límites de posicion, cada rayo ordinario ú estraordinario que sale del primer cristal se divide en dos al entrar en el segundo, y los hacecillos que produce siguen las leyes indicadas por las construcciones anteriores. Pero la intensidad de cada hacecillo depende tambien del ángulo de las dos secciones principales, y aumenta ó disminuye con este ángulo: segun el movimiento de las secciones principales, separa ó acerca el hacecillo al límite en que debe disiparse. De aqui debe inferirse que la formacion ó no formacion de los

dos hacecillos en el segundo cristal depende de las modificaciones físicas que han adquirido las moléculas en el primero; modificaciones que las hacen mas aptas para sufrir una ú otra refraccion en el segundo, segun el sentido en que se presentan sus superficies con respecto á su eje; lo cual no obsta para que la teoría indique con toda exactitud las *direcciones de traslacion* que deben tomar estas partículas si su estado físico les permite dividirse en las dos refracciones. La reflexion en la segunda superficie de los cristales nos ha presentado ya otros casos semejantes; porque en efecto, un rayo que se refleja interiormente en la segunda superficie de un cristal sufre las mismas influencias que si saliese enteramente de él para volver á entrar en otro ó en este mismo.

CAPITULO V.

Distincion de los cristales atractivos y repulsivos. Construccion de los micrómetros de imágenes dobles.

Mr. Rochon ha hecho servir la doble refraccion de los cristales para medir los ángulos pequeños de un modo demasiado útil á la astronomía y á la física para que podamos dispensarnos de hablar aqui de él, tanto mas, cuanto la disposicion del aparato nos ofrecerá un medio sencillo para reconocer si la doble refraccion producida por un cristal dado es atractiva ó repulsiva.

Supongamos dos prismas AB, A′B′, fig. 90 y 91, formados de un mismo cristal, y tallados de modo, que en el primero la superficie esterior AB sea perpendicular al eje AA′ del cristal, y en el segundo este eje sea la interseccion comun de las dos superficies A′B, AB.′ Supongamos tambien que los dos prismas son iguales, tanto en las dimensiones de sus partes como en las aberturas de sus ángulos.

En fin, pongámoslos en contacto perfectamente, oponiendo sus ángulos refringentes, como representa la figura; de suerte que su conjunto forme una plancha de superficies paralelas. Consideremos despues un rayo incidente LI, dirigido perpendicularmente á la superficie del primer prisma, y examinemos lo que sucederá.

Desde luego el rayo continuará su marcha en línea recta y sin dividirse en todo el interior del primer prisma, lo primero por ser perpendicular á la primera superficie, y lo segundo porque siendo paralelo al eje del cristal, es nula la fuerza de este, ya sea atractiva, ya repulsiva.

Luego que el rayo llegue á I′ en la superficie comun de los dos prismas que suponemos contiguos, se dividirá en dos hacecillos al entrar en el segundo prisma. El hacecillo ordinario no se refractará, pues pasa de un medio á otro de igual fuerza refringente; continuará, pues, su camino en línea recta, y saldrá perpendicularmente por la segunda superficie A′B′, y se hallará en la prolongacion de su direccion primitiva. Mas no sucederá otro tanto al hacecillo estraordinario, pues sintiendo este al entrar en el segundo prisma, ademas de la fuerza refringente ordinaria, la accion atractiva ó repulsiva que proviene del eje, sufre la nueva refraccion que resulta de ella, la cual se verifica como la otra siguiendo la ley de Descartes, segun el modo con que están tallados los prismas. Si el cristal de que están formados es repulsivo, fig. 90, esta segunda refraccion será mas débil que la primera, y el rayo estraordinario I′ I″ al atravesar el segundo prisma se separará de la normal N′ N″ en la superficie comun, mas que el rayo ordinario I′O, lo cual le dirigirá hácia la punta de este prisma, despues de su emergencia en el aire. Lo contrario sucederá en los cristales atractivos, fig. 91, pues siendo en el segundo prisma la refraccion estraordinaria mas fuerte que la ordinaria en el primero, el rayo es-

traordinario I′I″ al refractarse en él, se separará de la normal menos que el rayo ordinario, y por consiguiente se hallará dirigido hacia la base de este prisma, despues de su emergencia en el aire.

Hemos supuesto los dos prismas perfectamente contiguos entre sí, pero como en la práctica no podria obtenerse jamás este contacto perfecto, se pegan una á otra las dos superficies por medio de una capa de aceite de trementina espeso, ó de almáciga en lágrimas, sustancias transparentes, y cuya fuerza refringente es poco mas ó menos igual á la del crownglass. Como esta capa queda muy delgada, comprimiendo los dos prismas cuanto es posible, se puede suponer que tiene dos superficies paralelas. Entonces al atravesarla el rayo ordinario II′ sufre á su entrada y á su salida refracciones iguales y exactamente contrarias, de suerte que vueve á tomar su direccion primitiva al entrar en el segundo prisma, y por consiguiente el rayo estraordinario que resulta de él, toma en este prisma la misma direccion que si hubiese entrado directamente. La capa intermedia no produce, pues, otro efecto que el de determinar por su fuerza atractiva la salida de los rayos del primer prisma, y su entrada en el segundo, bajo incidencias en que estos fenómenos serian imposibles, si fuese necesario que el rayo para pasar de un prisma á otro, hubiese de salir al aire.

Puesto que el rayo ordinario despues de salir del segundo prisma conserva su direccion primitiva, al paso que el otro se separa de ella, es evidente que un ojo colocado en O, fig. 90 y 91, en la prolongacion del primero de estos rayos, no podrá recibir al mismo tiempo el segundo; pero si por el punto O se tira una línea O i'' paralela al rayo emergente estraordinario EI″, y se conduce esta línea atravesando los dos prismas, segun las leyes de la refraccion estraordinaria, lo cual producirá un rayo emergente perpendicular á la superficie del

primer prisma, es claro que esta línea indicará la direccion de un rayo incidente paralelo al primero que hemos considerado, y tal que el rayo estraordinario que proviniese de él, pasase por el punto O en que se halla el observador, y á donde no podrá llegar el rayo ordinario que le acompaña. Luego si el objeto L se halla bastante separado para enviar así dos rayos incidentes paralelos, ó sensiblemente paralelos entre sí, el observador colocado en O verá dos imágenes, una ordinaria y otra estraordinaria, pero nacidas de dos hacecillos incidentes distintos. Si los prismas son de un cristal repulsivo, fig. 90, el segundo prisma refractará menos la imágen estraordinaria que la ordinaria, y por consiguiente aparecerá hácia la base BB′, y por el contrario si es atractivo el cristal de los prismas, fig. 91, la imágen estraordinaria se refractará mas que la ordinaria, y aparecerá mas separada de la base del segundo prisma. Asi, pues, construyendo un conjunto de dos prismas de esta especie con un cristal cualquiera, se podrá reconocer por medio de este carácter si el cristal es atractivo ó repulsivo. Pronto manifestarémos otros medios mas sencillos, pero menos directos para conseguir el mismo objeto.

Pero ¿cómo podrá distinguirse cuál de las dos imágenes es la ordinaria y cuál la estraordinaria? Para saberlo no hay mas que aplicar la primera superficie AB á uno de los vidrios de una vidriera, y buscar en las inmediaciones algun objeto terminado por una arista rectilínea, situada de tal modo que los rayos que emanen de ella lleguen al vidrio casi perpendicularmente; la orilla de un tejado paralelo á la vidriera, y situado poco mas ó menos á la misma altura, llena muy bien esta condicion. Entonces mirando por el doble prisma, se verá duplicada su imágen, pero si es bien igual el ángulo de ambos prismas, como suponen todos nuestros razonamientos, una de las dos imágenes se hallará si-

tuada exactamente en la prolongacion de la imágen directa, mirada por la vidriera sola. Esta será, pues, la imágen ordinaria, pues solo los rayos emergentes ordinarios pueden quedar despues de su emergencia paralelos á los rayos incidentes. La otra imágen separada será la estraordinaria, y para determinar el sentido de su separacion, se volverá el prisma sobre el vidrio, hasta que quede paralela á la imágen directa, observando entonces si se halla hácia la base ó la arista del segundo prisma, en el primer caso el cristal será repulsivo, y en el segundo atractivo. Otra propiedad caracteriza tambien la imágen ordinaria; á saber, que es perfectamente *acromática*, es decir, exenta de coloracion; pues en efecto, los rayos que la forman no sufren mas descomposicion al atravesar el doble prisma, que si atravesasen una plancha de superficies paralelas. Mas no sucede lo mismo con los rayos estraordinarios, en los cuales se nota una descomposicion de colores, porque sus refracciones sucesivas no se hallan compensadas unas con otras, y asi no es acromática la imágen estraordinaria.

En las observaciones anteriores, la separacion angular de las dos imágenes se mide por el ángulo I′O *i*″, bajo el cual la direccion de los rayos estraordinarios corta á la de los rayos ordinarios despues de su emergencia. Este ángulo varía segun la naturaleza del cristal de que están hechos los prismas y segun la abertura angular BA′B′ que se les ha dado. Se puede fácilmente calcular cuándo se conoce esta abertura, y las dos relaciones de refraccion, y se halla que aumenta á medida que se abre el ángulo de los prismas, y cuanto mas se diferencian entre sí las dos relaciones de refraccion. Por esta razon, con igual abertura en los prismas, el espato de Islandia es de todas las sustancias conocidas la que da mayores separaciones, porque es la que produce la mas enérgica refraccion doble, pudiendo llegar hasta 43° 26′ 30″ la separacion

que puede obtenerse con los dobles prismas formados con esta sustancia. Se ha creido por mucho tiempo que los dobles prismas de cristal de roca no podian dar sino una separacion de 30′, ó á lo mas de 40′, y Malus fijó por límite 28′; mas esto provenia de que se suponian los prismas siempre separados por una capa de aire. Esta capa no influía sobre la direccion que los rayos podian tomar luego que habian entrado en el segundo prisma; pero su poca fuerza refringente presentaba un obstáculo á su salida del prisma anterior, y el cálculo daba por límite del ángulo el que permitia que el rayo saliese de este prisma. El raciocinio y la esperiencia han hecho ver que esta limitacion es infundada, y que la separacion con los dobles prismas de cristal de roca puede llegar hasta mas de 10 grados.

Supongamos, en general, que habiendo reunido asi dos prismas de un cristal cualquiera, se haya determinado por esperiencia ó por cálculo, el ángulo constante formado por los dos rayos emergentes ordinario y estraordinario, que provienen de un mismo rayo incidente perpendicular á la primera superficie. Si se prolongan estos dos rayos hasta que se corten en un punto cualquiera *c*, fig. 92, se podrán considerar como las piernas de un compás cuya abertura está determinada y conocida su cabeza, y si se quiere saber el diámetro de un disco circular bastará colocarle entre ellas de modo que toque á ambas, pues entonces es fácil calcular su diámetro por su distancia al vértice del ángulo. La operacion será tanto mas exacta cuanto mas pequeño sea el ángulo, porque entonces una diferencia pequeñísima en el diámetro del disco las producirá muy grandes en el punto del contacto.

M. Rochon ha aplicado ingeniosamente este método á la medida de los diámentros aparentes de los cuerpos celestes, introduciendo con este objeto un sistema de dos prismas en el interior de un telescopio astronómico. Sea A, fig. 93, el objeto de

este, AF su eje, F su foco, y SS′ un objeto muy distante, cuyo estremo S supondremos que se halla exactamente en la prolongacion del eje AF. El cono de rayos de luz emanados de S que cubre la superficie del objetivo, se halla concentrado por este en el foco F sobre el eje mismo de este cono, y forma en él una imágen luminosa del punto S. El cono emanado de S′ reunido del mismo modo en la prolongacion AF′ de su eje, da en F′ una imágen del punto S′, y produciéndose un efecto semejante en todos los otros conos que emanan de los puntos radiantes intermedios, la serie de los focos forma en FF′ una imágen del objeto. Ademas, si el ángulo FAF′ ó SAS′ es muy pequeño, y el objeto está muy distante, todos los puntos de la imágen se hallan sensiblemente á la misma distancia del objetivo A, de suerte que en la figura se la puede considerar como una pequeña línea recta FF′ perpendicular al eje AF del objetivo. Entonces el ángulo FAF′ ó SAS′ será el diámetro aparente del objeto visto desde el punto A. Entendido esto, coloquemos entre el objetivo A y su foco nuestro aparato de doble imágen, de modo que su primera superficie quede perpendicular al eje AF, fig. 94. Esto no alterará sensiblemente el tamaño de la imágen FF′, si las superficies esteriores del aparato están bien paralelas, pero es evidente que resultarán dos imágenes en el foco. En efecto, cada rayo incidente AF, AF′, se dividirá al entrar en el segundo prisma, y dará un rayo emergente estraordinario cf, $c'f'$, que tomará la direccion de emergencia que resulte de la doble refraccion. Ademas, limitándose á considerar los ejes de los hacecillos, los puntos c, c' en que se verifica la divergencia estarán fijos en el aparato prismático, á cualquiera distancia del objetivo que se le coloque, y los ángulos de separacion Fcf, $F'c'f'$, lo serán igualmente. De donde resulta que si se separa el aparato prismático del foco del objetivo, la imágen es-

traordinaria ff', que permanece siempre en el mismo plano que FF', se separará de la imágen ordinaria, y por el contrario se aproximará á ella si se acerca al foco el aparato prismático. En fin, cuando este movimiento llegue á colocar los puntos c, c' sobre la línea FF' en el mismo foco, los rayos emergentes ya ordinarios, ya estraordinarios que provengan de un mismo punto, se refractarán juntos, y no producirán en el ojo mas efecto que el de un solo punto radiante, de manera que las dos images coincidirán exactamente en todas sus partes.

Partiendo de esta posicion si el ángulo constante de separacion Fcf es mayor que FAF', es decir, que el diámetro aparente del disco, habrá una situacion del aparato comprendida entre A y F, en que las dos imágenes FF' ff' se hallarán exactamente en contacto, fig. 95. En este caso la imágen ordinaria FF' se hallará comprendida exactamente entre los dos lados del ángulo Fcf que espresa la separacion constante producida por la refraccion estraordinaria, y asi midiendo su distancia FC al vértice del ángulo, como veremos muy pronto que puede hacerse, se conocerá su tamaño absoluto FF'; y como se conoce tambien la distancia AF, que es igual á la longitud focal del objetivo, se podrá calcular el ángulo FAF' que subtende, y este será el diámetro aparente del objeto. Cuando este diámetro se halla comprendido en un ángulo muy pequeño, el cálculo hace ver que es proporcional á la distancia Fc, á lo menos si se hace uso siempre de un mismo objetivo y del mismo prisma doble.

La distancia Fc puede medirse por medio de una division longitudinal de partes iguales, trazada en la parte esterior del tubo del anteojo. Este tubo está hendido en la direccion de su longitud para poder hacer marchar segun se quiera el sistema de los dos prismas por toda la longitud focal AF. Se empieza determinando su posicion en el fo-

co, para lo cual se dirige el anteojo al objeto y se conducen los prismas hacia el ojo, hasta que se sobrepongan las dos imágenes formadas en el foco, y coincidan exactamente. Entonces se ve el punto de la division lateral á que corresponde le índice que lleva consigo el aparato prismático, y este punto es el cero desde donde deben empezar á contarse las distancias Fc. Supongamos que corresponde en la division al número 50, cuando se observa despues un objeto cualquiera y se han conducido las imágenes hasta el contacto, se observa de nuevo el punto de la division á que corresponde el índice. Sea este punto el número 125, entonces para este valor del diámetro aparente Fc será sin duda alguna igual á 125—50 ó 75 partes de la division, y para conocer de una vez la relacion de este número con el diámetro aparente, se emplea una mira circular ó esférica SS′, fig. 96, de un diámetro conocido, colocada á una distancia AC, que se mide directamente ó se determina por una operacion trigonométrica. De aqui se puede deducir por medio del cálculo el diámetro aparente SAS′ que subtende esta mira, vista á la distancia AS. Hecho esto, se observa la misma mira por el anteojo con el doble prisma, colocando el objetivo en el mismo punto A, y cuando se han conducido las imágenes al contacto por el movimiento de los prismas, se mide en la division lateral la distancia Fc. Entonces la relacion de esta distancia con el diámetro aparente SAS′ queda conocida, y se puede emplear en todas las demas observaciones, sirviendo tambien para calcular de antemano los diámetros aparentes que corresponden á cierto número de valores de Fc y gravarlos sobre el mismo tubo al lado de cada distancia, que es lo que se acostumbra hacer en los instrumentos usuales. Mas en vez de espresar en ellos los diámetros aparentes en minutos y segundos, se indica la relacion entre la distancia del objeto y su tamaño, lo cual proporciona el por-

der deducir uno de estos elementos conociendo el otro. Asi, por el bulto que hacen los hombres que componen un cuerpo de tropas, se puede graduar su distancia; y lo mismo se puede hacer en el mar con un buque, segun el tamaño que se supone en su arboladura. Sin embargo, estos resultados están tanto mas sujetos á error, cuanto mayor es la distancia y menor el objeto, de suerte que seria una necedad el querer servirse de este medio para medir, por ejemplo, la distancia de los astros.

En todo lo que precede hemos supuesto que el estremo F de la imágen ordinaria FF′, se halle precisamente sobre el eje del objetivo en el instante en que se observa el contacto. Esta condicion es indispensable para que el rayo incidente AI, que despues de su division abraza la imágen ordinaria, atraviese el aparato prismático perpendicularmente á sus superficies esteriores, único caso que hemos considerado hasta ahora. Pero si el objeto observado es un astro á quien su movimiento haga recorrer sucesivamente todo el campo del anteojo, ¿qué deberá resultar de aquí? Que entonces, matemáticamente hablando, el valor del ángulo F*cf*, no será constante en los diferentes periodos de su paso. Si estas variaciones son insensibles, como sucede cuando son muy agudos los ángulos refringentes de los prismas, se podrá establecer el contacto de las dos imágenes luego que el astro entre en el campo del anteojo, y subsistirá en toda la estension de dicho campo, pero aumentando mucho la abertura de los prismas, y por consiguiente la refraccion, que es consecuencia de ella, el ángulo F*cf* empezará á variar sensiblemente segun las diferentes incidencias que permita el campo del anteojo, y las imágenes puestas en contacto se separarán al atravesarle. Para evitar este inconveniente ha imaginado Mr. Rochon substituir á los dobles prismas de un gran ángulo, un conjunto de muchos prismas semejantes y de un ángulo muy pequeño cada uno, unidos unos á otros

de tal modo que las secciones principales coincidan exactamente en la misma direccion. En efecto, en un sistema semejante la separacion de los rayos aumenta con el número de los dobles prismas, y la influencia de la variacion de las incidencias sobre la separacion de las imágenes es mucho menos sensible que en un solo prisma doble que produjese la misma separacion, lo cual puede fácilmente demostrarse por la teoría. Pero es preciso tener mucho cuidado para que se verifique exactamente la sobreposicion segun las secciones principales, para que las imágenes no sean mas de dos; y es tambien necesario tomar algunas precauciones al tallar los prismas, para que no resulten coloridas, como esplicaremos despues.

Hasta aqui hemos procedido como si se observasen á la simple vista las imágenes FF′, *ff′* que el objetivo forma en su foco. Generalmente se miran estas imágenes por una lente ó un sistema de lentes dispuesto de modo que aumente su tamaño sin perjudicar á la claridad. Este sistema se llama *ocular* porque se coloca cerca del ojo, del mismo modo que el primer vidrio del anteojo se llama objetivo porque se dirige á la parte de los objetos. Pero por lo mismo que la accion del ocular es posterior á la formacion de las dobles imágenes, se ve bien que nada puede influir en la existencia ó no existencia de su contacto, del cual proporciona poder juzgar con mayor exactitud. Asi que todos los raciocinios que hemos hecho suponiendo la vista desnuda, se aplican igualmente al ojo armado de un ocular; y por esta razon no hemos contado con esta modificacion al esplicar los resultados.

De algunas apariencias singulares producidas por la doble refraccion.

Cuando se miran objetos pequeños al traves de un romboide de espato de Islandia, la disposicion

de las dos imágenes presenta algunas singularidades que son otras tantas consecuencias de la teoría. Asi es que no se habian escapado á Huygliens, que las ha examinado todas, y como son tales que pudieran causar embarazo á las personas poco habituadas á esta especie de consideraciones, creo deber indicarlas aqui brevemente.

Sea L, fig. 97, el punto radiante, S el ojo, que para mayor sencillez supondremos colocado en el plano de la seccion principal AB A′B′ del romboide, y tratemos de investigar cómo se verificará la vision en estas circunstancias.

Desde luego en este caso, como en el de cualquier otro cuerpo diáfano de superficies paralelas, habrá un rayo ordinario que podrá llegar al ojo. Sea LII′ este rayo; á su entrada en I por la primera superficie del romboide producirá un rayo estraordinaaio II'_1, pero este no podrá llegar al ojo. Para comprobarlo no hay mas que tirar por el punto de incidencia I la línea IA paralela al eje del romboide. Como la fuerza emanada de este eje repele las moléculas luminosas, es preciso que las que ceden á esta fuerza se retiren mas allá del rayo ordinario, y tomen la direccion II'_1, y como al llegar á I'_1, en la segunda superficie deben salir paralelamente á su direccion primitiva LI, resultará un rayo I'_1 S′, que siendo paralelo á IS, no puede pasar por el punto S en que está colocado el ojo. Con mayor razon se podria demostrar esto mismo respecto á cualquiera otro rayo estraordinario que proviniese de rayos incidentes mas próximos al ángulo obtuso A′.

La imágen estraordinaria se formará, pues, por rayos incidentes que se separarán de LI acercándose al ángulo sólido B. Entre estos se hallará uno L*i*, cuyo hacecillo ordinario no podrá llegar al ojo, pero sí el estraordinario *ii*′, despues de su emergencia, de suerte que el ojo percibirá dos imágenes, una ordinaria por el rayo SI′ y otra estraordinaria por

el rayo Si', y la primera parecerá siempre mas próxima que la otra al ángulo sólido pequeño B. Si se diesen las posiciones del ojo y del punto radiante con respecto al romboide, se podria fácilmente calcular la direccion de estos dos rayos, tomando por incógnitos los ángulos de incidencia y emergencia que forman con las dos superficies de entrada y de salida, pues respecto á cada rayo ordinario ó estraordinario, estos ángulos deben ser iguales entre sí. Pero siendo este resultado de pura curiosidad, nos basta haber indicado su marcha general. El cruzamiento de estos rayos en el interior del romboide se puede comprobar por medio de una esperiencia muy sencilla inventada por Mr. Monge. Dispuesto todo como representa la figura anterior, pásese con lentitud una carta por la superficie $A'B'$ situada á la parte del punto radiante, la cual llegando á i interceptará el rayo incidente Li que da la imágen estraordinaria. Entonces se verá desaparecer el rayo emergente Si', aunque segun la direccion de donde parece provenir se espera ver desaparecer primero el rayo SI'. A fin de que esta anterioridad sea muy marcada, es necesario colocar el ojo muy cerca del romboide, lo cual aumenta el ángulo S; y para obtener un objeto luminoso de un diámetro pequeño, se puede mirar la luz del cielo por un agugerito hecho en una carta, ó un punto negro marcado en un papel blanco. En cualquier caso es preciso separarse de él á alguna distancia, pues cuanto mas se acerque el punto L á la superficie del romboide, mas se acerca tambien á esta superficie el punto K en que se cruzan los rayos, pero por inmediato á ella que se suponga el L, con tal que esté fuera del cristal, de modo que se puedan aplicar las fórmulas de Huyghens á los rayos luminosos que emanan de él, la intercesion de los dos rayos se verifica en el interior del romboide, y por consiguiente se observa el fenómeno que acabamos de describir aunque con diversas se-

paraciones. La fig. 98 representa el caso en que el punto radiante y el ojo se hallan colocados en una misma línea recta perpendicular á las superficies del romboide.

Cuando se miran asi las dos imágenes de un punto luminoso á través de un romboide, cualquiera que sea la posicion que se le dé, la imágen ordinaria aparece siempre mas próxima al ojo que la estraordinaria, lo cual es tambien una consecuencia de la teoría.

Para conocer la razon de esto, consideremos la fig. 99 en que L es siempre el punto radiante, S el centro del ojo y SI′ el rayo ordinario que la refraccion conduce á él, pasando á través del medio AB A′B′, cuyas caras opuestas son paralelas. Si el ojo no fuese mas que un punto matemático, el rayo I′S seria el único de su especie que podria llegar á él, pero teniendo la pupila cierta estension, es claro que deberá recibir otros rayos ordinarios inmediatos á SI′, producidos por rayos incidentes próximos á LI. Estos rayos, saliendo de L, forman un cono que tiene en L su cúspide, y forman otro refractándose en la sustancia, y otro al salir de nuevo por la segunda superficie AB. Ahora bien, examinando por el cálculo la distancia SL″ del ojo al cúspide de este último cono, cualquiera que sea la naturaleza del cuerpo interpuesto, sea ó no cristalizado, se halla que el punto L″ está siempre mas inmediato al ojo que el punto L, y tanto mas inmediato, cuanto mas refracta el medio interpuesto, porque su refraccion aumenta la divergencia de los rayos emergentes. Ahora bien, esta divergencia es precisamente la que en general nos hace juzgar de la distancia de los puntos luminosos y de sus imágenes, y asi la imágen refracta debe parecer siempre mas inmediata al ojo que la imágen directa. Ahora bien, en el romboide de cristal de Islandia se verifican dos refracciones, de las cuales la ordinaria es la mas fuerte, puesto que la velocidad que

esta comunica á la luz está disminuida en la otra por la fuerza repulsiva; luego las imágenes ordinarias deberán parecer siempre mas inmediatas al ojo, á lo menos mientras la refraccion se verifique atravesando superficies planas, como hemos supuesto, y lo contrario se verificaria en un romboide hecho de un cristal atractivo, porque la refraccion estraordinaria seria en él mas fuerte que la ordinaria.

Estudiando la marcha de las dos refracciones en el plano de la seccion principal de un romboide de espato de Islandia, vimos que el rayo estraordinario se halla siempre arrojado hácia el ángulo sólido menor de la segunda superficie. En este caso, si el rayo incidente se dirige tambien hácia este ángulo, fig. 100, hay una incidencia en que la repulsion producida por el eje IA′ compensa exactamente el efecto que las fuerzas ordinarias deben producir, y el rayo estraordinario no se dobla al refractarse. El cálculo determina la incidencia á que se verifica este fenómeno, que es la de 16° 45′; mas solo se produce al lado de la normal que hemos considerado, pues al otro la fuerza repulsiva obra en el mismo sentido que las fuerzas refringentes ordinarias, y aumenta la separacion ordinaria del rayo. Pero si el cristal fuese atractivo, entonces el fenómeno se verificaria á este lado y no al otro.

ANALISIS DE LA LUZ.

CAPITULO I.

De la dispersion de la luz producida por la refraccion.

Hasta aqui no hemos considerado, por decirlo asi, mas que los ejes de los hacecillos luminosos refractos, sin haber contado con la *dispersion* que sufren al atravesar las sustancias refringentes. Ahora

vamos á examinar estos fenómenos, cuya analisis exacta y completa es uno de los mejores trabajos de Newton.

Cuando se miran los objetos por un prisma refringente, se sabe que sus imágenes no aparecen en el verdadero sitio que ocupan, sino que se hallan separadas hácia el vértice del ángulo refringente del prisma. Sea O, fig. 101, el ojo del observador, ACB la seccion hecha en el prisma por un plano perpendicular á sus aristas, y que pase por el punto O, y en fin SS′ el objeto colocado en este mismo plano. La imágen *ss′* se hallará elevada hácia el ángulo C porque aparece en la direccion OR, OR′, en que los rayos de luz salen del prisma despues de haber sufrido dos refracciones sucesivas en las superficies AC, BC. En los capítulos anteriores hemos estudiado bastante las leyes de esta separacion, y dado medios para calcular la marcha del rayo, ya en el prisma, ya fuera de él.

Pero desde entonces observamos que los contornos de la imágen no se hallaban terminados y concluidos como los del objeto, pues esta imágen se alarga en la direccion *ss′* perpendicular á las aristas del prisma, y se tiñe de los colores del arco iris. Esta coloracion es la que ahora vamos á examinar.

Para fijar las ideas supongamos que las aristas del prisma están colocadas horizontalmente, lo cual hace vertical la línea *s′*S, y que ademas el ángulo refringente del prisma se halle en la parte superior, como representa la figura. En fin, coloquemos mas allá del objeto un paño negro, á fin de evitar que sus rayos se mezclen con los de otra luz estraña, en este caso el borde inferior de la imágen aparece constantemente ribeteado de rojo, y el superior de azul claro y violado.

Si se observa de este modo un cuerpo blanco muy delgado, como un alfiler blanco, un hilo de plata ó de seda blanca, una tira de papel muy estrecha, &c., fig. 102, colocado en un fondo negro,

y paralelamente á las aristas del prisma, cuando este es bastante refringente no se percibe nada de blanco en la imágen ss', sino que se halla dividida en zonas paralelas de diferentes colores, entre los cuales se distinguen fácilmente tres tintas distintas, el rojo abajo, el azul arriba y el verde en medio (1). Cualquiera que sea la naturaleza de las sustancias cuyas imágenes se observan, con tal que sean blancas, dan exactamente las mismas series de colores vistas á través del prisma, y si sus dimensiones son iguales es absolutamente imposible distinguirlas.

Tratemos de analizar este fenómeno, y de ver las consecuencias á que conduce. La primera circunstancia que debemos observar es la dilatacion que sufre la imágen en la direccion de su altura. En efecto, si el objeto SS′ fuese una línea recta matemática paralela á las aristas del prisma, y si todos los rayos de luz que emanan de ella se refractasen en la misma proporcion del seno de refraccion al seno de incidencia, la figura de la imágen refracta SS′ deberia ser tambien una línea recta sin anchura, y aunque rigorosamente no se puede adelgazar tanto el objeto que se llegue á este término, sin embargo, es fácil ver que cuando es muy delgado, como por ejemplo, un alfiler, es inútil ya adelgazarle mas, pues no varía sensiblemente el ancho de la imágen observada. Aun hay mas, cualquiera que sea la longitud SS′ del objeto, fig. 101, si todos los rayos que despide se refractasen al atravesar el prisma segun la misma proporcion del seno de refraccion al seno de incidencia, el cálculo demuestra que se podria siempre hallar una po-

(1) Para hacer bien esta esperiencia es necesario servirse de un prisma de flintglass, cuyo ángulo refringente sea á lo menos de 60°. Entonces las zonas se hallan perfectamente coloridas, terminadas y distintas. A falta de un prisma de esta especie se podria formar uno con dos vidrios planos inclinados entre sí unos 60° ó mas, y entre los cuales se pusiese agua pura ó saturada con acetate de plomo, á fin de aumentar su fuerza refringente.

sicion tal, que el ángulo ROR′, comprendido entre los dos rayos emergentes que parten de sus estremos, fuese precisamente igual al ángulo SKS′ comprendido entre los dos rayos incidentes de que aquellos provienen, es decir, al mismo diámetro aparente, á lo menos suponiendo el objeto á una distancia suficiente para que pudiese mirarse como nula la del observador al prisma. La posicion de que hablamos es aquella en que el ángulo SIA es igual al ángulo OR′E. Pero en la naturaleza está muy lejos de suceder así; porque cualquiera posicion que se dé al prisma, cualquiera inclinacion que se le haga tomar con respecto á los rayos incidentes, jamás se puede llegar á hacer la imágen refracta tan delgada como la imágen directa; y la diferencia es tanto mas sensible, cuanto menor es el ancho del objeto. Este resultado, que veremos confirmado y generalizado por todas las esperiencias que hemos de hacer, nos obliga necesariamente á inferir que *todos los rayos de luz, emanados de los objetos terrestres, no siguen al refractarse la misma relacion del seno de incidencia con el seno de refraccion.*

Por otra parte hemos visto que la imágen del alfiler, de la seda blanca &c. está compuesta de bandas paralelas, cuyas tintas son diferentes; luego de aqui debemos inferir que la refraccion es desigual respecto á los rayos que producen la sensacion de estas diversas tintas; de suerte que la dilatacion de la imágen nace de la diferente refrangibilidad de los rayos que producen estos colores.

Ademas, puesto que la luz del alfiler, que produce todos estos colores, parecia blanca cuando el ojo la recibia directamente y antes de ser separada por el prisma, se ve que lo que llamamos blancura no debe ser otra cosa que la reunion de cierto número de rayos, que considerados aisladamente producen la sensacion de diferentes colores, pero que reunidos producen la del blanco. Esto es fácil de

comprobar, pues para ello basta volver el alfiler ó la tira de papel blanco, de modo que su direccion venga á ser perpendicular á las aristas del prisma refringente en vez de ser paralela. Entonces el estremo superior de la imágen aparece violado, y el estremo opuesto rojo; pero si el objeto es de un grueso igual en toda su longitud, estas son las dos solas partes de la imágen que aparecen coloridas, y todo el intermedio se presenta blanco como si se viese directamente. Ahora bien, es claro que al hacer girar el alfiler ó el papel no se altera en nada el modo con que la luz debe emanar de él; asi los rayos que parten de cada uno de los puntos del objeto sufren en el prisma las mismas modificaciones que antes, es decir, que los rayos rojos son los que se refractan menos, y los azules y violados los que mas. El no notarse esta descomposicion en el medio de la imágen es una prueba de que los rayos que vienen de diferentes puntos consecutivos recomponen el blanco por su sobreposicion, y su conjunto reproduce la blancura que la refraccion habia destruido en cada uno de ellos; y esta es la razon porque el alfiler ó la tira de papel han de ser de igual grueso en toda su longitud para que salga bien la esperiencia.

Hasta ahora no hemos observado mas que la luz refleja; mas la que emana inmediatamente de los cuerpos inflamados presenta tambien fenómenos semejantes, como se puede comprobar mirando por un prisma la llama de una bugía. La imágen de esta llama, como la de cualquiera otro objeto, está ribeteada de rojo y azul en sus dos estremos opuestos. Pero para observar estos fenómenos en toda su hermosura es preciso analizar por medio del prisma la misma luz del sol.

Para hacerlo del modo mas cómodo y mas exacto al mismo tiempo es necesario hacer reflejar la luz de este astro en el espejo de un heliostato, introducirla en seguida por un agujero muy p

queño en una pieza perfectamente obscura, que tenga siete ú ocho metros de largo, y recibirla en un carton blanco perpendicular al rayo reflejo. Esta imágen, perfectamente inmóvil, y que brilla con la luz mas viva y mas pura, ofrece para todas las esperiencias las condiciones mas favorables que pueden desearse. Mirándola con atencion se observará que el brillo de la luz no es igual en todos sus puntos, sino que es mas viva en el interior de la imágen, desde donde va degradando hácia las orillas en que se debilita su intensidad hasta llegar á ser enteramente insensible. Es necesario conocer exactamente todas estas circunstancias antes de someter esta luz á las esperiencias de la refraccion. Sea, pues, S S′, fig. 103, el diámetro del disco del sol, suponiéndole esférico, F F′ el diámetro del agujero que suponemos circular, y TT′ el plano en que se recibe la imágen luminosa. Nos vemos obligados á desnaturalizar aqui estremadamente todas las proporciones de estos tamaños para poderlos hacer sensibles en la figura; pero esto no altera en nada el razonamiento. Para ver ahora cómo se forma y distribuye la imágen del sol, trasmitida por la abertura, concibamos por los dos estremos SS′ de este astro dos rectas, tangentes á los bordes F F′ de la abertura: asi formaremos los dos conos T V T′, $t\,v\,t'$, uno de los cuales tendrá su cúspide fuera de la pieza y el otro dentro de ella. El primero de estos conos limita el espacio en que pueden penetrar los rayos solares, y por consiguiente su interseccion con el plano TT′ limita el tamaño de la imágen, que será igual á TT′; pero no toda esta estension se hallará igualmente iluminada. En efecto, si se considera un punto cualquiera M comprendido entre t y t', es decir, en el cono interior, un ojo colocado en este punto veria la imágen del agujero proyectarse enteramente sobre el disco del sol, puesto que si del punto M se tiran dos rectas tangentes á los bordes F F′, estas irán á encontrar á la

recta S S′ entre los puntos S y S.′ Pero si el ojo se hallase colocado fuera del cono interior, por ejemplo, en N ó en N′, no veria mas que una parte del disco solar, y esta parte disminuiria mas y mas, á proporcion que el ojo se acercase á los estremos T T.′ Segun esto, se ve que la imágen pura, é iluminada por la totalidad del disco del sol se halla comprendida entre los puntos *t t′*, y rodeado de una penumbra anular, cuyo ancho es T *t′* ó T′ *t*. Es fácil calcular las dimensiones exactas de todos estos elementos, cuando se conoce el diámetro F F′ de la abertura, su distancia C C′ al carton, y el ángulo S V S′ que subtende el disco del sol, es decir, el diámetro aparente de este, que es el mismo sin ninguna diferencia apreciable respecto á los puntos V *v*, F F.′ Asi se halla que el diámetro total T T′ del espacio iluminado es igual al diámetro T *t* ó T′ *t′* de la imágen solar vista desde la abertura sobre el carton; mas el diámetro T *t′* ó T′ *t* de la abertura, suponiendo siempre que los rayos de luz llegan libremente al carton, sin separarse de la línea recta ni atravesar otro medio que el aire.

Conocido y determinado todo esto, examinemos las modificaciones que hace sufrir á esta imágen la interposicion de un prisma. Para esto conviene adquirir uno A B C, fig. 104, de un vidrio bien puro, cuyo ángulo refringente sea á lo menos de 60°, y que esté colocado sobre un pie, dispuesto de modo que pueda girar al rededor de su eje. Para fijar las ideas supongamos horizontal el rayo solar F S. Se colocará en él el prisma, muy cerca del agujero, á fin de que reciba toda la luz introducida; y se dispondrán verticalmente sus aristas; lo cual hará refractar el rayo en un plano paralelo al horizonte: en la prolongacion del rayo refracto se colocará un cuadro, hecho de buen papel blanco, y colocado sobre un pie movible para poderle adelantar ó atravesar, subir ó bajar, segun convenga. Para que el espectro formado por el prisma sea bien claro y

los colores bien separados, es necesario colocar el cuadro á la distancia de cinco ó seis metros. Cuando todo se halla dispuesto asi, se hace girar poco á poco el prisma sobre su eje, y alternativamente de izquierda á derecha y de derecha á izquierda. Asi se ve que despues de haber hecho mover la imágen VR en una direccion, se llega á un término en que si se continúa girando aun mas el espectro, se mueve en direccion contraria; de suerte que entre estos dos movimientos opuestos permanece un momento estacionaria. Cuando se ha hallado este punto de equilibrio se fija en él el prisma, y el cálculo manifiesta que entonces se halla poco mas ó menos en la situacion indicada, es decir, que los ángulos de incidencia son iguales en suma á los de emergencia. Esta posicion ofrece grandes ventajas, pues no solo se conocen directamente por medio del cálculo los ángulos de incidencia y emergencia que corresponden á ella, lo cual evita el tener que medirlos, sino que se sabe tambien que si todos los rayos que componen la luz incidente siguen la misma relacion entre el seno de refraccion y el seno de incidencia, deben, despues de la refraccion, formar una imágen del objeto igual á este, es decir, en el caso actual, una imágen circular, igual en tamaño al diámetro aparente del sol visto desde el punto F, y aumentada de una penumbra igual al diámetro de la abertura en que se cruzan los rayos.

Ahora bien, disponiéndolo todo como acabamos de decir, la imágen refracta VR está muy lejos de ser circular; y forma sobre el cuadro blanco en que se proyecta un espectro colorido oblongo, terminado lateralmente por dos rectas horizontales, y en sus dos estremos por dos semicírculos. El estremo menos separado R está teñido de un rojo subido; y el otro estremo V, en que es mayor la refraccion, lo está de un violado obscuro, descubriéndose entre ambos estremos una infinidad de tintas. Esta prolongacion de la imágen no proviene de una imper-

feccion del prisma, por ejemplo, de impurezas en su sustancia ó de desigualdades en su pulimento; porque todos los prismas diáfanos, de cualquiera materia que sean, aun los prismas huecos y llenos de los líquidos mas claros, producen efectos análogos, sin haber diferencia sino en la longitud absoluta del espectro, que es mayor ó menor, segun la sustancia del prisma y la abertura del ángulo refringente. La prolongacion de la imágen refracta es, pues, un fenómeno constante que proviene de la naturaleza de la refraccion; y por lo mismo es preciso inferir de aqui que todos los rayos que componen la luz del sol no son igualmente refrangibles, pues si lo fuesen, la imágen no seria prolongada, sino circular en la posicion en que hemos colocado nuestro prisma.

Newton repitió aun esta esperiencia de otro modo; miró á través del prisma la imágen del sol que entraba por el agujero, como antes hemos hecho con el alfiler; y reconoció en ella la misma coloracion y la misma disposicion de colores.

Trató en seguida de comprobar esta importante verdad en todas las consecuencias que podian deducirse de ella. Si la dilatacion producida por el prisma proviene de la diferente refrangibilidad de los rayos luminosos, los que se hallan igualmente desviados por la refraccion son igualmente refrangibles. Asi, suponiendo que S, fig. 105, representa el centro de la imágen solar directa, y VR la imágen oblonga y colorida, producida por la refraccion vertical de un prisma, cuyas aristas esten horizontales, si se marcan en esta imágen líneas horizontales II, BB, VV, estas líneas designarán los límites de igual refrangibilidad. Por consiguiente, si se hace sufrir de nuevo á la imágen RV una segunda refraccion lateral por medio de un prisma, cuyas aristas esten colocadas verticalmente, los rayos contenidos en cada una de las líneas II, BB &c. no deberán separarse por la refraccion, puesto que son

igualmente refrangibles. Si el segundo prisma es idénticamente igual al primero, y se halla inclinado del mismo modo respecto á la luz incidente, su efecto sobre cada uno de los rayos contenidos en estas líneas deberá tambien ser igual á lo que era al principio (1). Por consiguiente el estremo inferior R′ de la segunda imágen se hallará á la misma distancia del estremo inferior R de la primera que este se halla de la imágen directa S. Y como lo mismo puede decirse de todos los demas puntos de la primera imágen VR, se sigue, que prolongando las líneas horizontales II, BB &c., deberá ser, despues de la segunda refraccion, RR′ igual á SR, VV′ igual á SV′, BB′ igual á SB, y asi de todos los demas puntos; de donde resulta que la segunda imágen debe estar comprendida entre las mismas líneas horizontales que la primera. La parte inferior de esta, que sufria la menor refraccion y aparecia roja, deberá formar tambien la parte inferior de aquella, y sufrir en ella la menor refraccion; y la misma relacion debe subsistir en el estremo opuesto que aparece violado. Ademas, la nueva imágen deberá estár terminada lateralmente por dos rectas, inclinadas 45° á la vertical SV; y en fin, su eje V′R′, prolongado, debe pasar por el centro S de la imágen directa. Haciendo la esperiencia se halla que todas estas consecuencias se verifican exactamente, como ha comprobado Newton; y esta conformidad nos asegura de un modo cierto la desigual refrangibilidad de los rayos de luz; y manifiesta que esta propiedad no les es accidental, sino inherente á su naturaleza, pues cada uno de ellos la conserva invariablemente despues de la primera refraccion, y aun despues de la segunda y de la

(1) Suponemos que el segundo prisma se ha colocado como el primero en la posicion en que son iguales los ángulos de incidencia y de emergencia; pues solo en esta posicion no se dilata ni contrae por la refraccion una imágen formada por rayos igualmente refrangibles.

tercera, como Newton ha comprobado igualmente.

Hemos observado ya que el diámetro del agujero por donde pasan los rayos debe producir aun en la imágen directa del sol una penumbra que hace que los bordes de esta imágen se degraden insensiblemente desde la luz mas viva hasta una completa obscuridad. Ahora bien, siendo la débil luz que forma esta penumbra de la misma naturaleza que la que forma el resto de la imágen, debe estar modificada del mismo modo por la refraccion, y por consiguiente debe hallarse en los lados rectilíneos del espectro oblongo, cuya pureza altera; en efecto, lo confirma asi la esperiencia. Para evitar la indeterminacion que resulta por esta causa, Newton colocó delante del agujero una lente de vidrio, que por su refraccion reunia en un solo foco todos los rayos enviados por cada punto del disco del sol; con lo cual resultaba una imágen de este astro blanca, circular y absolutamente exenta de penumbra. Hecho esto, recibia el hacecillo de rayos en un prisma colocado detras de la lente; y la imágen oblonga, formada por la refraccion, se presentaba igualmente exenta de toda penumbra en sus lados rectilíneos; de modo que estos aparecian terminados tan distintamente como la misma imágen directa que proyectaba la lente.

En la esperiencia de refraccion lateral que acabamos de describir, Newton habia hallado el medio de obrar en cierto modo aisladamente sobre cada rayo de igual refrangibilidad; pero hay tambien otro medio de conseguir el mismo fin, que Newton ha empleado igualmente, y es el que sigue:

Sea S F, fig. 106, un rayo de luz solar introducido en un cuarto obscuro por la abertura F. Cerca de esta abertura coloquemos un prisma ABC, que refractando desigualmente los rayos diversamente refrangibles que contiene este hacecillo, formará sobre un plano TT la imágen oblonga y colorida que hemos observado en las esperiencias an-

teriores. Para estudiar separadamente los rayos de diferente refrangibilidad de que se halla compuesta esta imágen, hagamos en el plano T T una pequeña abertura circular O, que corresponda á uno de los puntos de su longitud. Entonces pasará por esta abertura un cono pequeño de rayos sensiblemente homogéneos, que cayendo en otro plano T′ T′, paralelo al primero, formará en él una imágen circular de la abertura O. Esta imágen será de una sola tinta, por ejemplo roja, si la abertura O corresponde á los rayos de la primera imágen que producen la sensacion del rojo, verde si corresponde á los verdes, y asi sucesivamente. Ahora bien, puesto que esta luz homogénea se halla separada del resto del espectro, podemos estudiarla como queramos. Para esto haremos otro agujerito O en el segundo plano, de modo que pase por él un hacecillo de esta luz homogénea, al cual haremos atravesar un segundo prisma *a b c*. En este caso, si la diferente refrangibilidad de los rayos contenidos en la luz natural es la única causa de la prolongacion de las imágenes y de su coloracion por la refraccion, no debe producirse aqui tal efecto. El hacecillo homógeneo refractado por el prisma no debe cambiar de color; y si la inclinacion del prisma es tal, que sean iguales las incidencias y las emergencias, la imágen formada por este hacecillo debe ser redonda como la abertura. Asi es como se verifica efectivamente, segun han observado Newton y otros muchos físicos.

Ahora bien, si se hace girar con lentitud el primer prisma al rededor de su eje, los rayos que producen la sensacion de los diferentes colores pasarán sucesivamente por el agujero O, y llegarán tambien sucesivamente al segundo prisma *a b c* en la misma direccion O O′, y por consiguiente con la misma incidencia. Se verá, pues, formarse sucesivamente imágenes rojas, amarillas, verdes &c., segun pasen por la abertura O los rayos que producen la sensa-

cion de estos colores. Luego si es cierto que los rayos son desigualmente refrangibles, y si esta propiedad les es inherente, deben sufrir en el segundo prisma refracciones desiguales, las mas fuertes los violados, las menores los rojos, é intermedias los rayos que producen los otros colores; lo cual se conocerá fácilmente por la diferente altura de las imágenes, y por su movimiento para subir ó bajar, á medida que se haga girar el primer prisma. Los hechos confirman perfectamente todas estas consecuencias.

Esta diferente refrangibilidad de los rayos de luz debe producir necesariamente su efecto cuando se refracta la luz por medio de lentes esféricas. Porque ¿qué otra cosa son estas lentes que un conjunto circular de una infinidad de prismas de diferentes aberturas? Debe, pues, resultar respecto á cada rayo una distancia focal diferente, formando su foco mas próximo á la lente los rayos mas refrangibles, y mas distante los que lo son menos. Este resultado se halla demasiadamente confirmado por la esperiencia, pues la dispersion de los focos que de aqui resulta ha sido por mucho tiempo un obstáculo para la perfeccion de los anteojos. Newton, que le descubrió, hizo el fenómeno sensible directamente por medio de una esperiencia, cuyo efecto se consigue con facilidad por medio del heliostato.

Hasta aqui únicamente hemos examinado las propiedades de los rayos que dependen de su distinta refrangibilidad. Ahora vamos á estudiar otra propiedad descubierta igualmente por Newton, á saber, que la facilidad que tienen para reflejarse interiormente por refraccion es tambien diferente, y tanto mayor, cuanto mas refrangibles sean los rayos. He aqui cómo llegó á hacer este descubrimiento.

Habiendo tomado un prisma ABC, fig. 107, cuyos ángulos B y C eran de 45°, y por consiguiente recto A, hizo caer sobre AC un rayo de luz FM,

introducido por la abertura F en un cuarto obscuro; y al salir por M el rayo refracto fue á formar bajo el prisma una imágen colorida V R, como en las esperiencias anteriores. Haciendo girar el prisma poco á poco sobre su eje en la direccion A B C, los rayos refractos caen cada vez mas oblicuamente sobre la base B C, y los rayos emergentes salen tambien con mayor oblicuidad acercándose á esta base; de donde resulta, que aumentando cada vez la oblicuidad, llega el caso de no poder salir los rayos refractos, como hemos esplicado en el capítulo 3.° de la dióptrica. En el vidrio ordinario se verifica este fenomeno cuando los rayos en su incidencia interior forman con la base un ángulo de unos 48°. Luego si el ángulo refringente C es de 45° como en el prisma de Newton, los rayos incidentes son entonces casi perpendiculares á la primera superficie del prisma, y por consiguiente es casi nula la dispersion que les hace sufrir la primera refraccion; de suerte que son sensiblemente iguales sus incidencias interiores sobre B C. A pesar de esta igualdad, su reflexion interior es progresiva; porque si durante el movimiento del prisma se observa la imágen colorida V R, se ve que los rayos violados son los primeros que desaparecen de ella, en seguida el azul, despues el verde, y asi sucesivamente hasta el rojo; que es el último que desaparece; y entonces se verifica interiormente la reflexion total. Estos rayos, que se reflejan sucesivamente, salen por el lado B A del prisma á que son casi perpendiculares; y si fuesen los únicos que siguiesen esta direccion, seria este un medio muy sencillo de separarlos de los otros; pero no sucede asi, porque el hacecillo refracto sufre siempre en M una reflexion parcial, que verificándose del mismo modo sobre toda la luz incidente, envia directamente una porcion de ella hácia la superficie A B del prisma, de suerte que las partes del hacecillo V R, que en seguida se hacen reflejar, no hacen otra cosa que unirse á estas. Sin

embargo, aun asi se puede reconocer su influencia. Para esto coloquemos el prisma ABC en una posicion tal, que el hacecillo refracto VR salga enteramente de él: despues, en la direccion MN del hacecillo emergente producido por la reflexion parcial, coloquemos un segundo prisma A′B′C′, que refractándole, forme sobre el cuadro TT otro espectro R′V.′ Observemos atentamente la intensidad de este; y haciendo girar poco á poco el primer prisma sobre su eje, de modo que se aumente la oblicuidad de los rayos refractos con respecto á su base, veremos que en el momento en que los rayos violados no pueden salir por BC, la parte violada de la imágen R′ V′ toma un aumento de intensidad muy notable en comparacion de las otras tintas que la componen. En seguida aumentará el azul, el verde, el amarillo, y en fin, el rojo, cuando por efecto del movimiento del prisma llegue á hacerse en M la reflexion total. Newton ha variado de muchos modos esta esperiencia; pero todos convienen con este en cuanto al fondo.

En toda esta variedad de esperiencias, hechas sobre la luz reflejada por los cuerpos naturales ó por superficies especulares, ó en fin, sobre la luz refracta, se han hallado siempre rayos, que teniendo la misma incidencia en el medio, sufren diferentes refracciones, aunque no se produzca ninguna dispersion en cada rayo sencillo. Se ve ademas que este fenómeno no proviene accidentalmente de imperfecciones de las sustancias refringentes, sino que sigue leyes regulares que dependen de la posicion de los prismas, de sus ángulos y de su naturaleza. De todo esto resulta, pues, incontestablemente que *la luz del sol, como todas las demas especies de luz que podemos sujetar á nuestras esperiencias, es una mezcla de rayos heterogéneos, de los cuales unos son constantemente mas refrangibles que los otros, y que tomados separadamente son susceptibles de producir en nuestros órganos la sensacion*

de diferentes colores. Ademas, puesto que los rayos violados son conducidos dentro del prisma con incidencias interiores á que los otros pueden salir, debemos añadir, que *estos rayos varian tambien en su reflexibilidad, y que los mas refrangibles son al mismo tiempo los mas susceptibles de reflejarse interiormente por refraccion.* Segun la teoría de las fuerzas atractivas, esta es una consecuencia de la diferente refrangibilidad.

Otra consecuencia de esta desigualdad es que el espectro solar, producido por un prisma, no es otra cosa que la sucesion de una multitud de círculos sobrepuestos en parte unos á otros; cada uno de los cuales tiene un color sencillo desde el violado hasta el rojo mas subido. Esto es lo que representa la figura 108, en que debe suponerse que hay un número infinito de círculos en vez del corto número que está trazado.

Si la imágen dispersa es la del sol, cuyo diámetro aparente es como un medio grado, cada uno de estos círculos, visto desde el centro de la abertura circular, y suponiéndola infinitamente pequeña, subtendrá tambien un ángulo como de medio grado. Porque cada especie de rayos sencillos que viene desde los estremos opuestos del sol, forma al pasar por la abertura un cono, cuyo ángulo es igual al diámetro aparente de este astro; y rompiéndose en el prisma, formando ángulos iguales de incidencia y emergencia, el cono refracto tiene sensiblemente la misma abertura que el directo. Y como el tamaño de estas imágenes las hace sobreponerse unas á otras, resulta que en rigor la luz no es absolutamente homogénea en ninguna parte, á no ser muy inmediato á los lados rectilíneos del espectro en que los círculos se separan unos de otros.

El medio de simplificarla seria, pues, disminuir los diámetros de estos círculos para separarlos mas, conservando la misma distancia entre sus centros. Esto se consigue estrechando mucho la abertura, ó

sustituyéndola hendiduras muy finas, cuyo diámetro pequeño se halle colocado en la direccion de la refraccion. Se pueden ver en el tratado general las muchas precauciones tomadas por Newton para obtener esta separacion. Una de las mas seguras es la de concentrar el rayo de luz por medio de una lente antes de dirigirle al prisma, teniendo tambien cuidado de colocar fuera de la abertura, en la direccion del rayo solar, un tubo estrecho y dado de negro, á fin de evitar la luz estraña, que viniendo de las partes laterales del cielo y de una gran distancia, formaria en el cuarto en que se hace la observacion conos muy anchos, y por consiguiente produciria despues de la refraccion grandes círculos, que mezclándose entre sí y con la imágen principal VR, alterarian la pureza de sus colores.

La esperiencia decisiva que hemos indicado antes sobre la inmutabilidad del color debe hacerse con luz purificada, digámoslo asi, de este modo. Esta notable propiedad se conserva entonces, no solo despues de una refraccion, sino de todas las refracciones sucesivas que se puedan hacer sufrir al rayo de luz homogéneo. La reflexion no le destruye tampoco, pues si se colocan en esta luz moscas ú otros objetos pequeños, y se les mira á través de un prisma, aunque sea muy refringente, se les ve con tanta claridad como á la simple vista, y solo del color que los ilumina: mientras ni aun se les puede distinguir mirándolos de este modo cuando se hallan iluminados por la luz compuesta del sol, pues las diferentes partes de sus imágenes se alargan y desfiguran, en virtud de la diversa refrangibilidad de los rayos que emanan de ellos. La misma prueba puede hacerse con un libro impreso: si se halla iluminado por una luz homogénea, por fina que sea la impresion, los caractéres se leen perfectamente á través de un prisma, y es imposible distinguirles despues de la refraccion cuando los ilumina la luz compuesta.

Considerando la marcha de los hacecillos luminosos, purificados de este modo por una misma superficie refringente bajo diversas incidencias, se halla, como hemos anunciado ya, que hay siempre relacion constante entre el seno de refraccion y el seno de incidencia. Mas adelante veremos pruebas aun mas delicadas de este hecho, que en el sistema de emision es una consecuencia necesaria de la afinidad que los cuerpos refringentes ejercen sobre las moléculas luminosas.

En cuanto á la causa que hace que ciertas partículas de luz se separen por la refraccion mas que otras, teniendo todas una misma incidencia, no puede fijarse con exactitud. Pudiera creerse que esta desigualdad proviene de una diferencia de masa ó de velocidad; pero entonces los cuerpos que refractan igualmente una misma clase de rayos deberian refractar tambien igualmente todos los otros; mas esto no sucede asi, como veremos muy pronto por medio de esperiencias positivas. Hay cuerpos que refractan, por ejemplo, lo mismo ó menos que otros cuerpos los rayos verdes, al paso que refractan mucho mas los violados. Es preciso, pues, creer que la naturaleza química de las moléculas de la luz, y acaso su forma, tiene parte en este fenómeno, y hace que al atravesar diferentes cuerpos sus afinidades no conserven una relacion constante entre sí.

Hemos visto que ciertos cuerpos cristalizados tienen la singular propiedad de dividir en dos los hacecillos luminosos que los atraviesan, y hemos llamado á este fenómeno *doble refraccion*. En este caso, cada uno de los dos rayos refractos se dispersa tambien. La ley general de esta dispersion con respecto al rayo ordinario es la misma que en los cuerpos que refractan simplemente la luz; y en cuanto al rayo estraordinario, la ley de su dispersion es mas compuesta, porque sufre á un mismo tiempo las fuerzas refringentes ordinarias y las fuerzas repulsivas ó atractivas que emanan del eje del

cristal. Estas, del mismo modo que las anteriores, obran con desigualdad sobre las diferentes moléculas, y con mas energía sobre las mas refrangibles, como yo mismo he comprobado. Asi, segun su accion, conspira ó es opuesta á la accion ordinaria, aumenta ó disminuye la dispersion del rayo refracto estraordinario. Por ejemplo, cuando un rayo blanco cae perpendicularmente sobre las superficies de un romboide de espato de Islandia, fig. 78, las fuerzas refringentes ordinarias no tienden á dispersarle; pero la fuerza repulsiva que le arroja hácia el ángulo sólido pequeño B′ de la segunda superficie le dispersa de modo que los rayos violados se separan mas de la normal que los rayos rojos. Si se inclina el rayo incidente hácia el ángulo B, de modo que la refraccion ordinaria contraríe la fuerza repulsiva, la dispersion disminuye tanto, que llega á haber una incidencia en que el rayo estraordinario se quiebra sin dispersarse. Por el contrario, si se inclina el rayo incidente hácia el ángulo A, al otro lado de la normal, la fuerza refringente ordinaria conspira con la fuerza repulsiva, y la dispersion del rayo estraordinario es mayor que la del rayo ordinario, aunque con el mismo órden de colores. Por lo demas, la refrangibilidad propia de cada rayo y su color no se alteran ni cambian por la accion de los cristales.

Puesto que cada especie de tinta se halla unida invariablemente á los rayos de una refrangibilidad particular, podemos, para abreviar, designar cada rayo por la especie de color cuya sensacion produce en nosotros: y asi llamaremos rayos rojos los que son menos refrangibles y que producen la sensacion del rojo; rayos amarillos los que producen la sensacion de este color, y asi de los demas; no porque entendamos por esto que los rayos son en realidad rojos, violados ó amarillos, ni que contengan en sí el color, asi como los cuerpos sonoros no contienen el sonido, sino que solo nos valemos de

estos nombres para espresar la sensacion que son capaces de escitar, y que constantemente escitan en los ojos bien organizados.

Sin embargo, seria imposible dar de este modo denominaciones particulares á todos los rayos, porque como cada rayo dotado de una refrangibilidad diferente produce sobre nuestros órganos la sensacion de un color particular, el número de las tintas que se suceden en el espectro debe ser infinito como el de los rayos que las producen. Pero como el ojo mas acostumbrado no podria tener una sensacion distinta de tantos colores tan poco diferentes, basta establecer entre ellos cierto número de divisiones, que comprendiendo todas las demas variedades en sus intervalos, den un medio de fijar su sitio y su carácter con una exactitud proporcinada á nuestros sentidos. Esto es lo que hizo Newton, determinando en el espectro siete líneas de separacion principales desde los rayos que son mas refrangibles hasta los que lo son menos. Y definiendo cada una de estas divisiones por la especie de tinta que la es propia, ofrecen los colores siguientes: violado, azul oscuro, azul claro, verde, amarillo, naranjado, rojo.

No solo cada rayo homogéneo comprendido entre estos diferentes límites tiene su grado propio é invariable de refrangibilidad y de color que conserva por mas refracciones que se le hagan sufrir, sino que estos colores no se alteran por las reflexiones sobre los cuerpos naturales. "Todo cuerpo blanco, dice Newton, gris, rojo, verde, azul ó violado, como el papel, la ceniza, la mina de plomo rojo, el oro pimente, el añil, las cenizas azules, el oro, la plata, el cobre, la yerba, las violetas, las ampollas de agua teñidas de diferentes colores, las plumas de pavo real, la tintura del palo del Brasil y otras cosas semejantes, todo esto espuesto á una luz homogénea roja, parece enteramente rojo, á una luz homogénea verde, enteramente ver-

de, y asi de las demas." En una palabra, en la luz homogénea, de cualquier color que sea, todos los cuerpos aparecen únicamente del color de esta luz, con sola la diferencia de que unos la reflejan de un modo mas fuerte, y otros mas débil. "Pero no he visto, añade Newton, ningun cuerpo, que reflejando una luz homogénea, pueda cambiar sensiblemente su color." Ya se deja entender que esto solo es aplicable á la luz perfectamente homogénea, y por consiguiente para repetir estas esperiencias es necesario haber purificado el espectro solar con el mayor cuidado por los medios que hemos descrito, porque no hay entre todos los cuerpos de la naturaleza que brillan con los colores mas vivos, ninguno que refleje colores simples y homogéneos, como prueban estas mismas esperiencias, y como se puede comprobar, pues todos estos colores pueden descomponerse con el prisma, y se resuelven en un espectro en que se reconocen muchas especies de tintas. Luego si diferentes cuerpos iluminados por una misma luz blanca nos parece que tienen colores determinados, es solo porque reflejan con mas abundancia los rayos que producen la sensacion de aquella especie de color. Asi es que cuando se esponen á una luz bien homogénea, en que solo pueden reflejar rayos de una especie, es preciso que aparezcan todos del color de estos rayos, sin que haya mas diferencia que en la cantidad de ellos que pueden reflejar. Pero si se esponen á una luz mal separada, entonces ellos eligen entre los rayos que les hieren los que mejor pueden reflejar; y hallándose asi estos rayos en mayor número en la luz refleja que en la luz incidente, alteran sensiblemente el color de esta, lo cual no sucede jamás esponiendo los cuerpos á una luz bien homogénea.

Esta prueba puede repetirse de otro modo, en cierta manera opuesto. Si se toman dos cuerpos de diferente color, y se iluminan con una misma luz, de la cual se hayan quitado estos colores, uno y

otro aparecerán de la misma tinta. Por ejemplo, el color del oro es un amarillo casi puro, y el de la plata es el blanco, que contiene todos lo colores. Ilumínese la plata y el oro con una misma luz natural de que se haya quitado el amarillo, y ambos aparecerán del mismo color.

Para dar exactitud á estas observaciones es necesario fijar en el espectro la estension comparativa que ocupa cada uno de estos colores, que es lo que hizo Newton, pero las proporciones que obtuvo son relativas á la especie de vidrio que usaba, y no pueden dar, con respecto á otras sustancias, sino una indicacion general de la distribucion de los colores. Limitando, pues, á esto el uso de sus resultados, concibamos la longitud total del espectro, dividida en 360 partes iguales: en este caso los intervalos que ocuparán los diferentes colores serán, segun Newton,

El violado. . .	80
El azul oscuro.	40
El azul claro. .	60
El verde. . . .	60
El amarillo. . .	48
El naranjado. .	27
El rojo.	45

Mas adelante esplicaremos un método muy seguro para comparar estos intérvalos en las diversas sustancias refringentes. Newton ha creido que su proporcion era siempre constante, y este error, fundado sobre una autoridad de tanto peso, ha retardado durante mucho tiempo el descubrimiento de los anteojos acromáticos.

Recomposicion de los colores.

Hemos visto que la refrangibilidad y el color de cada rayo homogéneo no se alteran por la refraccion ni por la reflexion. Ahora vamos á hacer ver que estas propiedades tampoco se alteran por la

mezcla de rayos de diferentes colores, sino que cada uno de ellos las conserva en la mezcla, y las lleva invariablemente consigo. Esta importante verdad se demuestra por las siguientes esperiencias de Newton.

Se introduce un rayo de luz solar en un aposento oscuro, y despues de haberle refractado con un prisma, fig. 109, se recibe el espectro VR en una lente L, colocada verticalmente á una distancia del prisma igual al duplo de su distancia focal; entonces esta lente reune los rayos en un foco colocado al otro lado de su superficie á una distancia igual á la del punto P desde donde han empezado á dispersarse los rayos refractos. Mas allá del foco F los rayos vuelven á separarse de nuevo, y van á formar en el cuadro blanco T otro espectro V′R′ inverso del primero VR, porque la interposicion de la lente ha trastornado los colores. Dispuesto de este modo el aparato, examinemos las diferentes modificaciones que los rayos sufren en él. Desde luego los encontramos dispersos en RV por efecto de una primera refraccion; esta dispersion subsiste aun despues de haber atravesado la lente, y no se alteran los colores que corresponden á cada rayo, pues si se coloca un papel blanco cerca de la superficie posterior de la lente L, se ve en él un espectro semejante á RV, y en que es el mismo el órden de los colores. A medida que aumenta la distancia á la lente, es menor este espectro, porque los rayos que ha hecho aquella convergir se acercan mas y mas unos á otros, en fin, se reunen en el foco F, y forman en él una imágen blanca y circular. Sin embargo, despues de esta reunion se separan de nuevo con sus propiedades primitivas, pues estas propiedades se hallan en la formacion de la imágen R′V′, en la que se pueden hacer las mismas esperiencias que en un espectro que no hubiese atravesado la lente L, y cuyos rayos no se hubieran cruzado en el foco F, de donde se ve que su reunion en este punto no ha alterado de modo alguno su

refrangibilidad ni sus colores, como sucederia si al cruzarse ejerciesen alguna accion unos sobre otros.

Volvamos ahora á la imágen que se forma en el foco F, lo cual resulta de la impresion simultánea que producen en nuestro ojo todos los rayos diferentes que se reunen en este espacio. Asi, esta reunion es la condicion necesaria para escitar la sensacion de la blancura, y los rayos son capaces de escitarla despues de haber sido dispersados por el prisma P, y reunidos por la lente L del mismo modo que cuando se hallaban reunidos primitivamente en el hacecillo incidente.

A la verdad hemos observado ya que los rayos de diferentes colores no se hallan reunidos por la lente con todo rigor en un mismo foco, sino que forman desde su segunda superficie conos de diferentes logitudes, lo cual debe hacer su mezcla menos perfecta que en el hacecillo incidente. Pero esta reunion, que no se verifica en el concurso de los mismos rayos, se completa por la accion del cuadro blanco en que caen estos, pues reflejándolos de todas partes, los mezcla lo mismo que estaban en la luz incidente. Asi no se percibe ninguna coloracion sino en los bordes esteriores de la imágen en que esceden siempre un poco los conos formados por los rayos mas refrangibles.

Segun la idea que nos da esta esperiencia de la causa de la blancura, es de presumir que esta sensacion se modifique sustrayendo algunos de los rayos que concurren á producirla. En efecto se verifica asi, pues fijando el cuadro en el foco F en que se forma la imágen blanca y circular, si se interceptan en la lente cualesquiera de los rayos coloridos que concurren á su formacion, cubriendo el espacio en que caen con una regla negra colocada transversalmente sobre el espectro, al momento deja de ser blanca la imágen formada en el foco, y el color que toma es el que debe dar la mezcla de los colores restantes. Pero si se quita la regla y se de-

jan pasar estos rayos de modo que vengan á caer sobre este color compuesto, al momento vuelve de nuevo á presentarse el blanco. Si se interceptan, por ejemplo, el violado, el azul y el verde, el amarillo, el naranjado y el rojo forman una especie de naranjado en el cuadro; y si en seguida se dejan pasar de nuevo los colores interceptados al mezclarse con este naranjado, vuelven á reproducir el blanco. Estas composiciones y descomposiciones pueden repetirse cuantas veces se quiera, pues siempre se reproducirán del mismo modo presentando alternativas semejantes, con tal que la vista tenga el tiempo necesario para apreciarlas separadamente. Porque si se hace mover con mucha rapidez la regla sobre el espectro VR, llega un término en que el ojo no puede percibir la variedad de tintas que se suceden y se hallan interrumpidas por intérvalos de blancura, y en este caso se ve siempre blanco. Esta esperiencia sale aun mejor, substituyendo á la regla un carton negro CC, en que se han recortado varias tiras paralelas, de modo que se halle alternativamente una tira de carton y otra vacía.

Hemos probado que las propiedades colorantes de los rayos de luz homogéneos no se alteran por las fuerzas reflejantes; luego deberemos presumir que estas fuerzas no destruirán tampoco la propiedad que tienen de formar la blancura por su mezcla cuando han sido separados. En efecto, asi lo prueba la esperiencia. Sea SI un rayo blanco introducido en un aposento oscuro, fig. 110, refractémosle con un prisma ABC, que dispersándole produzca el espectro RV en un cuadro blanco colocado en el fondo del aposento á una distancia de cinco ó seis metros. Supongamos ahora que un observador colocado en O, muy inmediato al primer prisma, tiene delante de su ojo otro prisma semejante A′B C′ formado de la misma sustancia y con el mismo ángulo refringente. Si el observador coloca este segundo prisma paralelo al primero, los rayos de dife-

rentes colores que provienen de los diversos puntos del espectro RV, encontrarán al prisma A′B′C′ precisamente bajo los mismos ángulos que formaban en su emergencia con las superficies del primero, y pues hemos probado que la reflexion no altera su refrangibilidad, obrarán aqui como en el primer prisma, sufrirán en el las mismas refracciones en un órden contrario, y en fin, formarán en O á su salida un hacecillo de rayos emergentes paralelos como le formaban al tiempo de su incidencia en I. El observador que recibe todos estos rayos juntos debe pues percibir la sensacion de la blancura si la reflexion no ha alterado la facultad de producir esta sensacion, y asi se verifica efectivamente. Pero para hacer la esperiencia con exactitud es preciso tomar algunas precauciones.

Esta recomposicion de los colores por refracciones iguales é inversas puede producirse tambien con un solo prisma por medio de reflexiones interiores. A esto se deben las imágenes blancas multiplas que se ven salir despues de varias reflexiones por las diferentes superficies de los prismas espuestos á un rayo solar, imágenes cuya luz perjudica muchas veces para la exactitud de las esperiencias.

Esta es la ocasion de presentar una esperiencia que parece á primera vista que prueba que las propiedades colorantes de los rayos pueden alterarse por la reflexion, aunque en realidad prueba lo contrario. Para esto es necesario volver á tomar el aparato de que acabamos de hacer uso, fig. 109. Si en el foco F se coloca un papel blanco perpendicular al eje del hacecillo luminoso, la luz que cae sobre el papel parecerá blanca, pero si se sustituye al papel un plano metálico pulimentado que refleje la luz á cualquier punto del cuarto, aparecerá colorida. Parece, pues, que las propiedades que tenian los rayos al tiempo de caer sobre este espejo se hallan alteradas por la reflexion; pero esta opinion queda enteramente destruida por medio de un exa-

men atento. Los rayos luminosos caen, es verdad, poco mas ó menos en un mismo punto del plano metálico, pero no con la misma inclinacion; y como se reflejan formando el ángulo de reflexion igual al ángulo de incidencia, es indispensable que los separe la reflexion, de suerte que no hacen otra cosa que seguir mas allá del espejo con la divergencia que tenian al llegar á él, que es la misma que tendrian mas allá del foco F si se les hubiera dejado continuar directamente su camino. Cuando los rayos caían sobre el papel, la reflexion no se hacia de este modo, porque el papel no es un cuerpo pulimentado, y cada uno de los rayos se hallaba diseminado en todos sentidos indistintamente desde el punto de incidencia; y diseminando asi el papel simultáneamente todos los rayos que llegaban á él, se sigue que estos rayos venian á parar juntos al ojo. Pero aun en esta circunstancia la separacion de los colores se deja notar cuando el papel está muy inclinado á los rayos, porque aunque no está pulimentado, no es tampoco enteramente mate, y refleja de un modo regular parte de la luz incidente, sobre todo cuando los rayos forman con su superficie ángulos muy pequeños. Esta propiedad es comun á todos los cuerpos, y aun al mismo vidrio, á quien se ha quitado á propósito el pulimento frotándole con arena, como hemos observado ya al hablar de la reflexion.

En las esperiencias anteriores hemos visto producirse el blanco reuniendo los rayos heterogéneos dispersados por la refraccion de un primer prisma; pero igualmente se puede producir reuniendo los diversos colores dados por diferentes prismas, lo cual esplica la descomposicion progresiva que un hacecillo de un grueso sensible sufre en sus diferentes partes, al paso que se separa del prisma en que ha sido refractado.

De las tintas compuestas producidas por las mezclas de los colores simples.

Las esperiencias que acabamos de presentar prueban del modo mas evidente que cada rayo lleva en sí mismo su facultad colorante, que no puede cambiarse ni alterarse de modo alguno, asi como tampoco su refrangibilidad. Pero lo que es muy digno de notarse es que esta facultad colorante no les es particular, pues pueden componerse mezclas artificiales de colores que producen en nuestros órganos la misma sensacion que un color homogéneo. Esto puede hacerse de muchos modos, y uno de los mas sencillos consiste en emplear el aparato de la fig. 109, en que los rayos dispersos por un prisma se reunen por una lente en un foco sin color. Supongamos que delante de la lente se coloca un carton negro TT, fig. 111, en el que se hayan hecho varias aberturas rectangulares W, H, que se puedan abrir y cerrar segun se quiera. Si se coloca el carton de modo que el espectro caiga sobre estas aberturas, se podrá dejar pasar solo tal ó tal especie de rayos en una proporcion dada, los cuales yendo á reunirse siempre en el foco de la lente, pintarán en él sobre un carton blanco la tinta particular que resulte de su mezcla. De este modo se halla que cada color puede ser imitado por la mezcla de los dos colores inmediatos. Asi la mezcla del naranjado y del amarillo verdoso da el amarillo; la mezcla del amarillo verdoso y del verde azulado da un verde vivo. Tambien se consigue el mismo color, aunque no tan bien, con el amarillo y el azul claro. Este se imita por la mezcla del verde azulado y el azul oscuro; y en fin, hasta el violado se imita mezclando el azul claro con el rojo. Pero todas estas mezclas, miradas á través de un prisma, se resuelven en sus elementos, separados por la refraccion, mientras que esta no al-

tera los colores producidos por los rayos homogéneos, y esto constituye el carácter esencial que los distingue.

Tambien se pueden imitar mas ó menos perfectamente los colores simples, mezclando entre sí polvos de diferentes colores, que es como componen los suyos los pintores; pero estas mezclas nunca pueden compararse en vivacidad con los colores de la luz, y el prisma manifiesta tambien su composicion separándolos.

Tambien se puede imitar la blancura por medio de mezclas semejantes, pero siempre de un modo imperfecto, porque los polvos de color que se usan para esto absorven siempre una gran parte de luz que llega á ellos, que es la razon por qué aparecen del color complementario al que absorven. Asi es que con estas mezclas no puede componerse sino un blanco gris y sucio como el que resultaria de una mezcla de un polvo perfectamente blanco con un polvo negro; pero aumentando la intensidad de la luz que las ilumina, se puede aumentar su brillo y llegar á hacerle igual al de los cuerpos mas blancos, por ejemplo al del papel, mas cuando este recibe poca luz.

Estas mezclas, variadas hasta el infinito, pueden dar orígen á una infinidad de tintas diferentes de los colores simples del espectro; pero no hay ninguna de estas tintas que no pueda reproducirse por medio de una mezcla conveniente de colores simples, con la ventaja de presentar un brillo infinitamente mas hermoso. Considerando las diferentes partes simples que componen el espectro como otras tantas fuerzas que obran sobre nuestro órgano, y midiendo la influencia de estas fuerzas en las diferentes mezclas que pueden formarse con los colores prismáticos reunidos en el foco de una lente por el método que acabamos de indicar; Newton llegó á obtener una regla empírica, por medio de la cual se puede calcular de antemamano la especie de tinta

que producirá una mezcla de rayos simples cuya especie y proporcion sean conocidas.

Si despues de haber descrito desde el centro C, fig. 112, un círculo de un radio igual á la unidad, se divide su circunferencia en 7 partes proporcionales á los números $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{15}$, $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{16}$, $\frac{1}{9}$, se tendrán valuando estas partes en grados (1)

RO = 60° 45′ 34″
OJ = 34 10 38
JV = 54 41 1
VB = 60 45 34
BI = 54 41 1
IU = 34 10 38
UR = 60 45 34.

Considérense ahora estos arcos en su órden sucesivo, como que reprentan los siete colores principales de la luz que componen el espectro, de suerte que la circunferencia entera represente toda la serie de tintas porque pasa esta luz desde los primeros rayos rojos hasta los últimos violados. Despues determinando los centros de gravedad de todos estos arcos sucesivos en *rojobiu*, colóquese en cada uno de ellos un peso proporcional al arco total que le corresponde, y considérense estos pesos como otras tantas fuerzas que conspiran á atraer á sí el centro C, en que se supone colodado el ojo. En este supuesto es evidente que el ojo se hallará en reposo como que se halla colocado en el centro de gravedad de todos los pesos, y esta quietud corresponderá á la blancura perfecta que produce en el la sensacion simultánea de todas las tintas de la luz simple cuando estan mezcladas en las proporciones

(1) Esta valuacion solo exige una simple regla de compañía: la suma de todas las fracciones es á 360°, como una de ellas es al arco que la corresponde. La suma de las fracciones es $\frac{3}{9}+\frac{2}{10}+\frac{2}{16}$, ó $\frac{79}{120}$. Por consiguiente si se quiere saber el arco que corresponde á la fraccion $\frac{1}{10}$, será $\frac{\frac{1}{10}\times 360^{\circ}}{\frac{79}{120}}$, ó 54° 41′ 1″.

en que se hallan naturalmente en el espectro. Pero supongamos ahora que se altéran estas proporciones, como lo estan siempre, en una mezcla colorida distinta del blanco; entonces será preciso colocar en cada centro de gravedad parcial, no ya el peso total del arco que le corresponde, sino la mitad, el tercio ó en general la parte n que corresponda de este peso segun contenga la mezcla dada, la mitad, el tercio ó la parte n de la luz que compone este color en el espectro. Hecho esto, si se toma el centro de gravedad de todos estos centros parciales, no coincidirá ya con el centro del círculo total, pues en el caso de que coincida, la mezcla será blanca; y si por el contrario se acerca mucho á uno de los centros parciales, la mezcla ofrecerá como dominante el color que corresponde á este centro. En fin, en cualquiera parte donde caiga, por ejemplo, en G, bastará tirar desde el centro á este punto la línea CG, cuya direccion indicará el color dominante en la mezcla, y su longitud la vivacidad de aquel. Por ejemplo si CG se halla exactamente intermedia entre CV y CJ, el color resultante será el amarillo mas puro; pero si CG se acerca á CJ ó á CV, este amarillo tirará á naranjado ó á verde. En el primer supuesto, si G cae muy cerca de la circunferencia, el color será fuerte y vivo en el mayor grado; si cae á igual distincia de la circunferencia y del centro, el color tendrá solo la mitad de viveza, como resultaria de una mezcla del amarillo mas vivo con igual cantidad de blanco. En general, si representamos la distancia CG por Δ, siendo 1 el radio del círculo, $1-\Delta$ espresará aproximadamente la cantidad de blanco que entra en el color compuesto, Δ espresará la parte que este color tiene del simple hácia donde se dirige CG, y de este modo se conocerá la naturaleza é intensidad de la tinta. Sin embargo, debe tenerse presente esta restriccion, que si el punto G cae en la línea CR ó muy cerca de ella, siendo el rojo y el

violado los principales elementos de la tinta compuesta, no puede corresponder la mezcla á ninguno de los colores prismáticos, sino que formará un color de púrpura, que se acercará mas al rojo ó al violado, segun se halle el punto G á uno ú otro lado de la línea CR, y en ambos casos el color compuesto tendrá mas brillo que el simple. En géneral se obsérva la mayor analogía entre los efectos del violado y del rojo hasta tal punto, què con el azul y el rojo se forman tintas que producen en el ojo la sensacion de un hermoso violado, y este retorno de las tintas á sí mismas, enteramente análogo á la consonancia de las octavas, es el que ha conducido á Newton á comparar, como ha hecho muchas veces, las impresiones de los diversos colores con las que producen los intervalos musicales.

Segun la estension que da su regla á los arcos que representan los siete colores principales del espectro, no se hallan dos cuyos centros de gravedad estén diametralmente opuestos. Asi es que en cualquiera proporcion que se mezclen dos de estos colores, su centro comun de gravedad no puede nunca coincidir con el de la circunferencia, lo cual indica que jamás pueden producir el blanco, sino cuando más un calor pálido que se aproxime á aquel. En efecto, asi lo acredita la esperiencia. "Mezclando solamente dos colores primitivos, dice Newton, no he podido conseguir un verdadero blanco. Ignoro si podria obtenerse con tres colores, mas estas son curiosidades que poco ó nada sirven para la inteligencia de los fenómemos naturales, pues en cuantos blancos produce la naturaleza hay ordinariamenté una mezcla de todos los colores primitivos, y por consiguiente una composicion de todos ellos, lo cual hace aplicable nuestro método."

No nos falta, pues, otra cosa sino reducir este método á una fórmula analítica. La regla dada por Newton puede servir para producir la sensacion de la blancura por medio de una sucesion rápida

de papeles de los siete distintos colores, para lo cual no hay mas que dividir un círculo de carton en las proporciones que hemos indicado ya, pintarle con los colores mas puros que puedan obtenerse, y hacerle girar con rapidez al rededor de su centro.

CAPITULO II.

Influencia de la diferente refrangibilidad de los rayos en la vision á través de las superficies refringentes.

Desde que se nos ha presentado el fenómeno de la dispersion en las esperiencias de refraccion, hemos previsto los efectos generales que debian resultar de él en la vision por medio de prismas triangulares. Los conocimientos que despues hemos adquirido sobre las propiedades individuales de los rayos simples, y sobre la constancia de sus propiedades coloríficas, confirman enteramente nuestras inducciones, y nos ponen en estado de enunciarlas con mas exactitud.

Cuando un punto luminoso infinitamente pequeño se ve por refraccion á través de un prisma triangular, cada especie de rayos simples que emanan de este punto da una imágen de él teñida de su color particular. La diversa refrangibilidad de los rayos de diferentes especies hace que estas imágenes se hallen separadas y colocadas mas al lado de otras en el mismo órden que sus colores ocupan en el espectro, hallándose mas separadas las que son producidas por rayos mas refrangibles. Ahora bien, si en vez de un solo punto radiante infinitamente pequeño se observan muchos puntos dispuestos unos al lado de otros, cada uno de ellos producirá un espectro semejante; pero estos espectros pueden sobreponerse en parte de manera que produzcan la blancura en los puntos en que se

mezclen, como sucede en general, cuando se observan objetos de una estension sensible. Asi, cuando la superficie de estos objetos es blanca é igualmente luminosa, las partes interiores de la imágen refracta parecen blancas, y la coloracion de la imágen solo se manifiesta en sus estremos en el sentido general de la refraccion.

Newton ha presentado un hecho fácil de observar, y que á primera vista parece no puede comprenderse en esta teoría, aunque en realidad no es sino una consecuencia de ella. Habiendo colocado horizontalmente la base de un prisma ABC, fig. 113, delante de una ventana abièrta, colóquese el ojo en O de modo que se reciba en él la luz del cielo que refleja interiormente sobre su base; en tal caso, cuando los rayos reflejos formen con la base un ángulo de 50° poco mas ó menos, se verá aparecer un arco azul celeste de cierta anchura SS′, que se estenderá por toda la longitud del prisma volviendo su concavidad hácia el ojo; y la parte de la base SB, situada mas allá de este circo, aparecerá mucho mas brillante que la parte S′A que se halla al otro lado. Para esplicar esta apariencia singular supongamos que el ángulo de reflexion NSI que corresponde á la parte convexa del arco es el ángulo mas pequeño á que empieza á verificarse la reflexion total respecto á los rayos rojos, de manera que puedan reflejarse totalmente bajo una incidencia mas próxima á la normal SN. Supongamos del mismo modo que N′S′I′ sea el ángulo mas pequeño de reflexion total respecto á los últimos rayos violados; en este caso desde B hasta S podrá haber rayos de todas especies que sufran la reflexion total, y lleguen en seguida al ojo; pero mas acá de S ningun rayo rojo estremo podrá percibirse por ser la incidencia interior muy inmediata á la perpendicular. Del mismo modo al paso que el punto de incidencia interior se acerque á A, dejará de existir sucesivamente la posibilidad de la reflexion total hácia

el ojo respecto á los diferentes rayos, hasta S′ en que esta posibilidad cesará aun respecto á los últimos rayos violados, de manera que entre S′ y A no se verificará la reflexion total respecto á ningun rayo. Asi, reuniendo estos resultados, se ve que desde B hasta S la reflexion será viva y brillante, porque será total y comprenderá los rayos de todos colores. Desde S hasta S′ la reflexion total irá debilitándose mas y mas y limitándose á los rayos mas refrangibles, lo cual debe producir una zona en que dominen los colores de estos rayos; y en fin, desde S′ hasta otro cualquier punto mas inmediato al ojo, la reflexion no será total respecto á ningun rayo. El ojo no recibirá, pues, de este espacio mas que la débil porcion de luz producida por la reflexion parcial, y por consiguiente deberá aparecer oscuro en comparacion á la brillante intensidad de BS. Por medio del cálculo se pueden fijar todos los límites de este fenómeno.

Se ve tambien que el complemento del color de este arco SS′ por los rayos que salen bajo del prisma debe producir despues de su emergencia un arco en que domine el rojo, poco mas ó menos como en la esperiencia de Newton, descrita en el capítulo anterior.

Esta teoría da tambien la esplicacion y la medida de los fenómenos del arco íris. Es sabido que este meteoro presenta el aspecto de uno, y algunas veces de dos arcos coloridos con todos los colores del espectro. Unicamente se produce cuando llueve y brilla el sol al mismo tiempo; mas no basta la reunion de estas dos circunstancias, sino que es necesaria cierta posicion de las nubes, del observador y del sol; y uno de sus caractéres es que el centro de este arco se halla siempre diametralmente opuesto á aquel astro. Estas relaciones han hecho pensar hace mucho tiempo que el arco íris era producido por la refraccion de la luz en las gotas del agua de la lluvia; y en efecto, se le ve reprodu-

cirse en la especie de lluvia artificial producida por los caños de agua y cascadas, sobre todo cuando se hallan agitadas por el viento. Para comprender cómo puede dispersar la luz esta refraccion, consideremos un globulillo de agua esférico, sobre el cual cae un rayo solar infinitamente delgado S I, fig. 114, y sigamos la marcha de este rayo. Desde luego sufrirá en I una primera refraccion, que le dirigirá hácia I′, donde una parte de su luz se refractará de nuevo y saldrá al aire en la direccion I′ R′; pero el resto se reflejará al interior del globulillo hácia I″, en cuyo punto se verificará un efecto semejante al primero, es decir, que una parte se refractará y saldrá al aire, y el resto se reflejará interiormente hácia I‴; aqui volverá á producirse el mismo efecto, y continuará asi indefinidamente. Esta teoría puede comprobarse por la esperiencia, haciendo entrar en un cuarto obscuro un rayo solar muy delgado, dirigido por un heliostato, y haciéndole pasar por un cilindro de vidrio lleno de agua. La marcha del rayo por el interior del agua se hace perfectamente visible por la reflexion parcial de luz que producen las moléculas del agua; y las emergencias sucesivas podrán notarse colocando el ojo en la direccion de los rayos emergentes. De este modo se reconoce que estos rayos se dispersan, y dan la serie de los colores prismáticos; su intensidad se debilita, al paso que se les observa despues de un número mayor de divisiones: y en fin, llegan á ser tan débiles, que no es posible percibirlos.

El fenómeno del arco íris resulta asi de los espectros coloridos que salen de las diferentes gotas de agua despues de dos refracciones, separadas por una ó dos reflexiones intermedias; pero ¿cómo la superposicion de estos espectros parciales compone los colores del arco y determina su ancho? Esto es lo que vamos á examinar.

Para hacerlo con mas sencillez consideremos pri-

meramente un solo rayo incidente, de un color simple, por ejemplo rojo: si despues de haberse éste refractado en el globulillo se refleja una ó muchas veces en su superficie interior, y en seguida vuelve á salir al aire, es claro que generalmente despues de su emergencia formará cierto ángulo en su direccion primitiva. Este ángulo será constante respecto á todos los rayos de igual naturaleza que penetren el globulillo con la misma inclinacion; pero variando esta variará tambien aquel. Para formar una idea clara de estas variaciones consideremos el caso particular en que el rayo no sufre mas que una reflexion interior, despues de la cual vuelve á salir al aire, fig. 115. Si se calcula en este supuesto el valor numérico de la separacion que sufren varios rayos incidentes, paralelos, repartidos sobre la superficie del globulillo á pequeñas distancias, se halla que la separacion empieza siendo nula bajo la incidencia perpendicular en que el rayo atraviesa el globulillo por su centro, y va aumentando progresivamente hasta cierto límite de incidencia, que es como de unos $59\frac{1}{2}^{\circ}$ en los rayos rojos; de manera, que entrando un manojito de estos rayos paralelamente en el globulillo en I bajo esta incidencia, y reflejándose en su fondo, vuelven á salir de él tambien paralelamente, aunque su direccion general ha variado en 42°; pero siendo mayor la oblicuidad de las incidencias, la separacion disminuye como habia aumentado; y esta disminucion continúa hasta los últimos rayos tangentes al globulillo. Si se reciben á una distancia bastante grande de este todos los rayos emergentes, de modo que el globulillo pueda considerarse como un punto, es claro que todos los que correspondan á diversas separaciones se irán desviando unos de otros al paso que se alejen del globulillo; de suerte que al fin vendrán á ser demasiado débiles para poder producir la sensacion del globulillo á un ojo colocado en su direccion, mientras este podrá ser afectado por

los rayos emergentes que correspondan al maximum de separacion, puesto que siendo paralelos entre sí, llegan á cualquiera distancia que sea sin separarse, y su efecto será tanto mas vivo, cuanto que si son de una densidad uniforme al tiempo de su incidencia, se compriman y condensen al salir bajo esta emergencia. Supongamos ahora una fila de globulillos semejantes, dispuestos circularmente unos al lado de otros, de modo que los rayos refractos que emanen de ellos, y que suponemos ser del mismo color, puedan llegar al ojo: en este caso producirán la idea de una línea luminosa; y muchas filas semejantes, colocadas unas al lado de otras, producirán, á causa de la abertura sensible de la pupila, una faja colorida, cuyo ancho será igual á dicha abertura.

Las mismas consideraciones pueden aplicarse á los casos en que son mas numerosas las refracciones y reflexiones, pues respecto á cada una de ellas hay siempre un límite de incidencia en que los rayos emergentes muy inmediatos, nacidos de un mismo hacecillo, salen sensiblemente paralelos entre sí, y pueden trasmitirse á lo lejos sin debilitarse.

Ahora bien, para esplicar las consecuencias de estos resultados supongamos que un observador colocado en O, fig. 116, mira á una gran nube compuesta de una infinidad de globulillos de agua esféricos. Tiremos desde su ojo al centro del sol la línea S O C, para denotar la direccion de los rayos incidentes que supondremos exactamente paralelos, que es lo mismo que considerar al sol como un punto infinitamente distante. Esto supuesto, se producirá en la primera superficie de los globulillos una reflexion parcial de todos los colores que componen la luz incidente, lo cual dará una tinta blanquizca mas ó menos sombría, esparcida sobre toda la superficie de la nube; pero si esta es suficientemente estensa, se verán ademas dos arcos concentricos con todos los colores del espectro. Porque

si desde el ojo O se tira la recta OV, que forme con OC un ángulo de 100° 17′, y se la hace girar al rededor de OC, describiendo una superficie cónica, todos los glóbulillos de agua que se hallen en la prolongacion de esta superficie tendrán precisamente la posicion necesaria para que los rayos violados, que son los mas refrangibles despues de haber sufrido dos refracciones y una reflexion intermedia, salgan paralelos entre sí, y lleguen al ojo en O; lo cual no se verificará en ningun otro sitio de la nube; de suerte que en virtud de estos solos rayos el espectador verá sobre la nube un arco violado, cuyo eje será OC, y su centro C. Pero ademas verá otra infinidad de arcos concéntricos y esteriores á este, cada uno de los cuales será formado por una sola especie de rayos simples; y á medida que estos sean menos refrangibles, mayor será el diámetro de sus arcos; de suerte que el mayor, compuesto del rojo subido, subtendrá un ángulo ROC de 42° y 2′. Asi el ancho total de la faja colorida será de 42° 2′ — 40° 17′, esto es, de 1° 45′; el rojo se hallará á la parte de afuera y el violado á la de adentro.

Lo contrario sucederá despues de dos reflexiones. En efecto, si por el punto O se tiran las líneas OR, OV′, que formen con OC ángulos de 50° 59′ y 54° 9′, y se hace girar á ambas al rededor de OC, la primera encontrará todos los glóbulillos, que despues de haber hecho sufrir á los rayos rojos dos refracciones separadas por dos reflexiones intermedias, pueden enviarlos al ojo paralelos entre sí, y la segunda dará el límite análogo respecto á los rayos violados. Entre estos dos arcos habrá otros de todos los colores intermedios del prisma, y su conjunto formará una segunda banda colorida de 54° 9′ — 50° 59′, esto es, de 3° 10′ de ancho. Esta banda tendrá sus colores en un órden inverso que la primera, es decir, que el rojo estará á la parte de adentro y el violado á la de afuera, y la distan-

cia entre los dos arcos rojos será de 50° 59′—42° 2′, esto es, de 8° 57′.

Tales deberian, pues, ser las dimensiones y distancias de los dos arcos íris que apareciesen en las nubes si el sol no fuese mas que un punto; pero este astro tiene un diámetro aparente sensible, cuyo valor medio puede suponerse como de unos 30.′ Segun esto, si se consideran los arcos que acabamos de determinar como producidos por rayos emanados del centro del disco, los rayos emanados de la circunferencia ó del interior formarán otros tantos arcos semejantes y del mismo tamaño, cada uno de los cuales tendrá por eje la línea tirada desde el ojo del observador al punto del sol de que emanan. Por consigüiente, si desde el punto C se describe un círculo C′C″C‴, igual al diámetro aparente del sol visto desde el punto O, no se formará solo al rededor de este centro un arco violado á la distancia de 40° 17′, sino que se formarán otros tantos arcos como puntos hay en el círculo C′C″C‴, cada uno do los cuales puede ser centro á su vez, es decir, que se formará una banda circular, violada, de un ancho igual al diámetro aparente del sol, y cuyo radio interior será de 40° 17′—15′ ó 40° 2′, y el esterior de 40° 17′+15′ ó 40° 32.′ Del mismo modo el arco rojo, que se hallaba á 42° 2′ de OC, será una banda roja, cuyo borde interior tendrá por radio 41° 47′, y el esterior 42° 17′; de suerte que el ancho total del íris comprendido entre estos dos estremos será de 42° 17′—40° 2′, es decir 2° 15′ ó 30′ mas que si el sol fuese un punto. Del mismo modo el ancho del íris esterior, que hemos hallado de 3° 10′, llegará á ser de 3° 40′; su radio interior, que era de 50° 59′, será de 50° 44′; el esterior, que era de 54° 9′, será de 54° 24′; y en fin, la distancia entre los dos íris, que era de 8° 57′, se hallará reducida á 8° 27.′ Pero en razon del ancho y sobreposicion de los arcos parciales que los componen, sus colores estarán mucho menos marcados

que en la primera suposicion. Estas dimensiones, determinadas por medio del cálculo, son exactamente conformes con las que indica la observacion cuando los colores de los arcos son muy vivos y bien marcados. Habiendo Newton medido un dia un arco íris por medio de los instrumentos que entonces tenia, halló que el radio esterior del íris interior era de unos 42°, y que el ancho del rojo, amarillo y verde de este íris, tomados juntos, era como de 63 ó 64 minutos, ademas de tres ó cuatro minutos que se podian añadir en consideracion al rojo esterior, que se hallaba en parte debilitado y oscurecido por el brillo de las nubes del rededor. El ancho del azul era de 40 minutos lo menos, sin contar el violado, que se hallaba tan oscurecido por el brillo de las nubes, que no le fue posible medir su ancho. Pero suponiendo que el ancho del azul y el violado juntos fuese igual al del rojo, el amarillo y el verde reunidos, todo el ancho de este íris interior deberia ser de 2° 15′, que es lo que hemos hallado antes. La menor distancia entre este íris y el esterior era de unos 8° 30.′ El íris esterior era mas ancho que el interior; pero su color era tan débil, sobre todo á la parte del azul, que no pudo medir su ángulo. Otra vez que los dos arcos aparecian mas distintamente, halló Newton que el ancho del íris interior era de 2° 10′; y que en el esterior el ancho del rojo, el amarillo y el verde era al ancho de los mismos colores en el arco interior como 3 á 2.

Newton, en el pasage en que esplica esta admirable teoría, atribuye la primera idea de la esplicacion del arco íris á Antonio de Dominis, arzobispo de Spalatro, que la comprobó, dice, por medio de observaciones hechas con una bola de vidrio llena de agua, y colocada en diferentes posiciones con respecto al sol y al observador. Newton añade que Descartes ha comprobado la observacion del íris esterior. Pero probablemente Newton no habia leido,

la obra de Dominis, pues hubiera visto que este prelado, despues de haber concebido vagamente que el arco íris podia ser producido por la refraccion en las gotas de agua, no trató de comprobarlo por medio de las esperiencias de que habla Newton; y el modo con que esplica la formacion de este meteoro está muy distante de la verdad. Estas esperiencias se deben en realidad y únicamente á Descartes: este filósofo ha hecho respecto á la verdadera teoría del arco íris cuanto podia hacerse en una época en que no se conocia aun la diferente refrangibilidad de los rayos de luz. En efecto, determina desde luego por medio de un cálculo numérico la marcha de los rayos luminosos que penetran en una gota de agua, y que salen de ella despues de haber sufrido una ó muchas reflexiones. Este cálculo le hace ver que de todos los rayos que pueden caer sobre una gota de agua, solo los que la penetran formando cierto ángulo pueden llegar al espectador sin separarse unos de otros, y por lo mismo sin debilitarse. De aqui reconoce en general las verdaderas circunstancias en que puede producirse el fenómeno del arco íris, y las comprueba por medio de esperiencias directas. Falta señalar la causa de los colores, y Descartes, no conociéndola, la atribuye con mucha sagacidad á otro fenómeno mas sencillo, á saber, el de la descomposicion de la luz por medio del prisma; y dice que la parte de la gota de agua en que se refracta la luz debe dispersarla, como haria un prisma de agua de superficies planas, cuyo ángulo refringente fuese igual al que forman entre sí los planos tangentes á la gota en los puntos por donde entran y salen los rayos.

Ademas del arco íris aparecen algunas veces en la atmósfera otros meteoros luminosos, como por ejemplo, grandes coronas blanquizcas que se manifiestan al rededor del sol y de la luna á una distancia angular, que ordinariamente es de 45°, y las parhelias y paraselenas, que son imágenes del

sol y de la luna, acompañadas comunmente de un gran número de particularidades dignas de atencion.

CAPITULO III.

Del acromatismo.

Llámase acromatismo la destruccion de toda coloracion producida en las imágenes de los objetos vistos por medio de dos ó muchos prismas. Si estos hubiesen de ser todos de una misma naturaleza, la compensacion de sus refracciones se verificaria cuando tuviesen ángulos iguales y en direccion opuesta, de suerte que su conjunto formase una plancha de superficies paralelas; en cuyo caso los rayos que los hubiesen atravesado volverian tambien á tomar la direccion primitiva que tenian antes de la refraccion. Pero si hubiese sustancias que pudiesen producir iguales dispersiones con diferentes refracciones absolutas, se concibe que formando con ellas sistemas semejantes de prismas, se obtendrian imágenes de los objetos, que separadas de su direccion primitiva, estarian, sin embargo, perfectamente privadas de color. Se podria, pues, aplicando la misma oposicion á los prismas curvos que forman los bordes de las lentes esféricas, obtener objetivos compuestos que con una distancia focal limitada produjesen detrás de sí imágenes, sin color, de los objetos, y se podrian emplear con una ventaja infinita en la construccion de los anteojos. ¿Pero existen en la naturaleza sustancias que se compensen de este modo, ó en su defecto se puede suplir por una compensacion aproximada? En este caso ¿sobre qué principios deberá fundarse esta aproximacion? ¿cómo deberá procederse para obtenerla con sustancias dadas? ¿es mas fácil obtenerla con unas que con otras? He aqui otras tantas cuestiones importantes que nos conviene resolver.

Para esto consideremos un rayo perfectamente homogéneo SI, fig. 117, que despues de haber atravesado un número cualquiera de prismas de una naturaleza y ángulo cualquiera, llega en O al ojo de un observador. Tiremos desde este punto una línea OS al objeto de que emana el rayo, y que para mayor sencillez supondremos infinitamente distante, á fin de poder considerar la línea OS como paralela á la direccion de incidencia SI. Es claro que si esta direccion es conocida, así como las posiciones de los prismas, su naturaleza, sus ángulos y el sitio en que se halla el observador, podrá determinarse por medio del cálculo el ángulo de separacion ROS, comprendido entre la direccion primitiva OS y el rayo emergente OR. Concibamos ahora que el rayo SI en vez de ser simple sea compuesto como la luz blanca cuando haya atravesado el sistema de prismas, fig. 118, se hallará disperso en una infinidad de rayos emergentes, que en general tendrán distintas direcciones *uu′*, *oo′*, *rr′* desde el violado hasta el rojo; de suerte que el observador colocado en la direccion de uno de estos rayos solo percibiria aquel. Pero si suponemos que una infinidad de hacecillos, blancos todos emanados del mismo punto luminoso, llegan juntos á la primera superficie del prisma, entonces el observador colocado en O podrá recibir todas las diferentes especies de rayos simples por distintos puntos de emergencia, los cuales se hallarán tirando desde el punto O las lineas OR′, OO′, VV′, respectivamente paralelas á *rr′*, *oo′*, *uu′*, y terminadas del mismo modo en la superficie de emergencia del último prisma, pues estos rayos, conducidos por el interior de los prismas sucesivos, cada uno con la relacion de refraccion que le es propia, irán á salir paralelamente á la direccion de la luz incidente, y por lo mismo se hallarán en esta luz. Ahora bien, para quitar al observador la sensacion separada de estos distintos rayos no hay mas que disponer el sistema de pris-

ma de modo que salgan todos paralelos entre sí, pues entonces, siendo nulos los ángulos O'OV', O'OR', &c., bajo los cuales se cruzan en el ojo, coincidirán los puntos de incidencia V', O', R', y por consiguiente el hacecillo de rayos introducido en el ojo no tendrá absolutamente ningun color.

Se ve, pues, por esta analisis que la determinacion rigorosa del acromatismo da para cada rayo una condicion particular á que deben satisfacer el sistema de prismas, de donde se sigue que puesto que hay una infinidad de rayos diversamente refrangibles, habrá tambien en rigor una infinidad de condiciones, que no pudiendo verificarse todas, pues solo puede emplearse un número limitado de prismas, harán imposible la solucion del problema. Pero volverá á presentarse como posible, si en vez de querer establecer el paralelismo respecto á todos los rayos, nos contentamos con conseguirle respecto á dos, tres ó mas, cuyas condiciones podamos cumplir por medio de otros tantos prismas dispuestos de un modo conveniente. En efecto, si reunimos asi dos rayos estremos del espectro, por ejemplo, el violado y el rojo, ó los dos estremos y un medio como el rojo, el violado y el verde, se concibe que podrá producirse una destruccion de los colores intermedios suficiente para no producir en el ojo un efecto sensible, de modo que se realice asi físicamente el acromatismo, aunque sea imposible obtenerle con todo rigor.

En efecto, esto es lo que se hace, y el cálculo hace ver que empleando dos prismas se pueden reunir asi dos rayos, y en general tantos rayos como prismas se empleen. Si no se emplean mas que dos prismas, deben estar opuestos por las bases, como representa la fig. 119, de modo que sus refracciones se opongan una á otra; y en efecto, si ambos prismas fuesen de una misma sustancia, hemos visto que en esta posicion, y teniendo ángulos iguales, se acromatizarian mutuamente.

Pero cuando no es la misma la naturaleza de las sustancias, ¿cómo se determinará la relacion de los ángulos refrigentes con que deben acromatizarse? Desde luego se concibe que se puede aproximar por la consideracion del tamaño del espectro que dan los prismas de estas dos sustancias construidos con un mismo ángulo. En seguida se puede aproximar aun mas probando á debilitar gradualmente el que produce mayor dispersion, y en que la combinacion de los dos prismas tiñe las imágenes en el sentido en que las dispersa. Cuando se ha llegado á obtener asi un principio de compensacion, se puede determinar la mejor compensacion posible por medio del aparato siguiente, que MM. Cauchoix y Biot han aplicado con el resultado mas feliz á un gran número de esperiencias exactas.

Al estremo de un buen anteojo acromático y paralelamente á su eje, se fijan dos varillas metálicas TT, fig. 120, opuestas diametralmente, y agujereadas transversalmente en dos puntos A, por donde pasan los ejes de dos bastidores de cobre CC, que pueden girar libremente sobre las rectas AA, perpendiculares al eje del anteojo, y cuyos movimientos se miden por medio de círculos graduados. A estos bastidóres se aplican los prismas cuya compensacion quiere determinarse, y el todo del aparato resulta tal como representa la figura. Para que la esperiencia salga completamente bien, es preciso que los ángulos de los prismas sean ya tales, que oponiéndolos uno á otro, casi formen un acromatismo completo, lo cual se obtiene, como hemos dicho, por medio de ensayos. Segun lo que antes hemos visto la dispersion producida por cada prisma no depende solo de su abertura y de la naturaleza química de la sustancia que le compone, sino que varía tambien segun la diferente incidencia de los rayos en sus dos superficies, entrando esta incidencia como elemento en las condiciones analíticas que es preciso observar para hacer paralelos entre sí,

despues de su emergencia, los rayos de distintas especies. Esta variacion se aprovecha para determinar por medio de la esperiencia la posicion en que la compensacion es mas perfecta. Para esto supongamos que se han dispuesto el anteojo y los dos prismas de modo que pueda verse por medio de este sistema un objeto blanco muy distante. Si la imágen de este objeto se halla perfectamente blanca, los prismas están bien colocados, y esta posicion es realmente la que da el acromatismo; pero se conoce que no es probable que pueda conseguirse al primer golpe. En general sucederá que despues de haber opuesto los ángulos refringentes de ambos prismas, la imágen del objeto aparecerá aun colorida de un modo sensible, en cuyo caso se hará girar lentamente uno de los prismas en el sentido que parezca mas conveniente para disminuir los colores. Sino basta el movimiento del uno, se harán mover los dos sucesivamente; y en fin, se hallará la posicion que produce la compensacion mas perfecta, se fijarán los prismas en esta posicion, y no faltará mas que medir los ángulos que forman entre sí y con los rayos que los atraviesan, para lo que sirven los círculos graduados que miden los movimientos de los bastidorcitos. Sin embargo, hay que tomar algunas precauciones preliminares para determinar el punto preciso de cada division que coloca cada bastidor perpendicularmente al eje del anteojo, y para disponer los prismas de modo que sus ángulos refringentes se hallen colocados en un mismo plano. En las esperiencias que hacen MM. Cauchoix y Biot el objeto que les sirve de mira para determinar el acromatismo es una tira de papel blanco pegada sobre un carton negro; su ancho es como de un decímetro, y su largo de un metro. Colocan el carton verticalmente á una distancia como de cien metros, de modo que se halle horizontal la longitud de la banda blanca, y disponen los prismas de modo que los planos de sus ángulos refringentes en que se ve-

rifica la dispersion estén verticales, lo que consiguen arreglándolos por la arista de una torre ó un edificio separado, y haciéndoles girar sobre su bastidor hasta tanto que no produzca ninguna separacion lateral. Cuando se ha hallado la posicion conveniente, se fijan en ella, fijando tambien el pie del anteojo por medio de un tope que le priva de todo movimiento horizontal. El conjunto de estas disposiciones facilita mucho la maniobra que conduce al acromatismo; porque cuando se ha llegado á obtener la imágen de la mira en el anteojo, no puede ya mudarse sino verticalmente, y asi, mientras con una mano se hace girar lentamente uno de los prismas para destruir los colores, lo cual altera necesariamente la posicion de la imágen, se puede volver á conducir fácilmente á su sitio alzando ó bajando el anteojo con la otra mano. Si los ángulos refringentes de los dos prismas son muy desproporcionados entre sí para que los colores puedan corregirse por sola la variacion de incidencia, se conoce con mucha facilidad; porque suponiendo, por ejemplo, que el segundo prisma sea demasiado fuerte, y que la arista de su ángulo se halle dirigida hácia la tierra, en tal caso, si este prisma obrase solo sobre la luz, daria una imágen colorida de la mira en que los rayos rojos como menos refrangibles aparecerian los mas altos. Ahora bien, si la imágen de la mira, vista por los dos prismas opuestos, presenta constantemente esta disposicion de colores en todas las posiciones, es una prueba segura de que la dispersion del primer prisma que obra en sentido contrario de la que produce el segundo, no es nunca bastante fuerte para igualarles, y menos para separarla, y por consiguiente la diminucion de colores que se podrá producir con estos dos prismas estará muy distante de ser la mejor que pueda obtenerse. En tal caso es preciso debilitar un poco el ángulo refringente del segundo prisma que se halla ser demasiado fuerte,

y en seguida se le vuelve á colocar en el aparato. Si se le ha disminuido lo bastante, se hallará que haciendo mover ambos prismas alternativamente se obtendrán imágenes de la mira en que las bandas rojas se hallaran en la parte superior, y otras en que por el contrario se hallarán en la parte mas baja. En aquellas domina el prisma posterior, en estas el anterior. Entre estos estados opuestos se halla una ó mas posiciones en que las bandas que limitan la imágen son las menores posibles, y estas combinaciones dan las posiciones mas favorables. Deteniéndose en la que parece mejor, es decir, en aquella en que las bandas de color son mas estrechas y menos vivas, se fijan los prismas y el anteojo por medio de sus tornillos de presion. Es preciso evitar con el mayor cuidado las fajas amarillas ó encarnadas, porque siendo estos dos colores mas brillantes que los otros, su efecto se manifiesta con mayor fuerza cuando sus resultados pasan á la construccion de anteojos, que es su objeto principal. Por el contrario se deben preferir las posiciones de los prismas que presentan fajas de colores opacos, como por ejemplo, un rojo de ladrillo, ó un azul verdoso, pues siendo menos vivo el efecto de estos colores, se perciben mas dificilmente en los anteojos, y son enteramente insensibles en las observaciones hechas de noche.

Cuando se ha encontrado la posicion que parece mas favorable, se observan las posiciones de ambos prismas por medio de los círculos graduados; se deducen de ellas los ángulos de incidencia y emergencia de los rayos medios sobre sus superficies, y estos elementos, introducidos en las fórmulas del acromatismo, determinan las relaciones de los ángulos refrigentes con que los prismas se compensarian del mismo modo estando sobrepuestos y presentados perpendicularmente á los rayos de luz. En las primeras esperiencias de refraccion que hemos presentado en el capítulo primero, hemos ob-

servado qué hay respecto á cada prisma una posicion en que la imágen refracta se hace estacionaria, y que antes y despues de este límite crecen igualmente la refraccion y la dispersion. Segun esto, en las esperiencias del acromatismo deben hallarse respecto á cada prisma varias posiciones equivalentes, en que produzca igual efecto sobre la imágen. Esto es lo que se verifica en efecto; pero calculando la marcha de los rayos en estas diferentes posiciones, suponiendo una relacion de refraccion constante bajo las diferentes incidencias, se llega siempre por último á la misma relacion de compensacion con una increible exactitud. Estas conformidades la prueba mas delicada y segura de la constancia de la relacion de refraccion respecto á cada rayo simple.

Por mucho cuidado que se ponga en estas esperiencias, si se emplea un anteojo que aumente cincuenta ó sesenta veces los objetos, y se hace uso de prismas cuyo ángulo refringente sea á lo menos de 15 grados, circunstancias esenciales para hacer bien sensibles las fajas de color, se percibe inmediatamente que el acromatismo rigoroso es enteramente imposible, escepto el caso en que ambos prismas estén formados de una misma sustancia. Cuando los ángulos refringentes de los prismas estan muy inmediatos á la proporcion que determina el mejor acromatismo, se puede hacer pasar sucesivamente cada color de un lado á otro de la imágen, sin hallar una posicion intermedia en que las fajas de color desaparezcan enteramente. Esta imposibilidad prueba del modo mas sensible que la dispersion de los rayos de luz no se verifica conforme á las mismas leyes en las sustancias de diferente naturaleza química, y manifiesta que cuando se han reunido dos rayos homogéneos cualesquiera, de modo que sean paralelos entre sí á su salida de los prismas, los demas rayos del espectro se hallan inclinados con respecto á ellos, y forman listas de color á las orillas del objeto. Segun esto es evidente que pa-

ra obtener compensaciones perfectas seria preciso emplear mas de dos prismas. En algunas construcciones de anteojos acromáticos se emplean hasta tres, pues un número mayor debilitaria demasiado la luz por las reflexiones sucesivas que sus superficies la harian sufrir; y porque ademas cuando el acromatismo de estos instrumentos se halla determinado cuidadosamente por el método que acabamos de esplicar, sus imperfecciones no provienen de la diferente refrangibilidad de los rayos de luz, sino de la difusion de los focos en que las lentes esféricas de una abertura sensible reunen cada uno de los hacecillos simples incidentes que cubren su superficie.

En fin, la cantidad absoluta de la dispersion medida entre dos colores determinados es tan variable como la ley misma con que se siguen los diferentes rayos en cada espectro. Asi lo manifiesta claramente nuestro método por la diferente naturaleza de las listas de color que se obtienen cuando se compensan unas con otras diferentes sustancias.

Cuando se componen sustancias cuyas fuerzas refringentes son muy desiguales, se halla en general que la son tambien sus fuerzas dispersivas. Por ejemplo, el óxido de plomo, introducido en la composicion del vidrio, aumenta considerablemente su fuerza dispersiva, é igualmente hace aumentar su fuerza refringente, aunque en una proporcion menor. De todas las sustancias que han esperimentado MM. Cauchoix y Biot, la que les ha parecido que tiene mayor fuerza dispersiva es el líquido conocido en química con el nombre de *azufre carburado.* La dispersion que produce decupla de la del agua en iguales circunstancias, y la fuerza refringente del azufre y la del carbon sólido son tambien una y otra muy considerables. Sin embargo, esta correspondencia entre los aumentos de la refraccion y los de la dispersion está muy lejos de ser general, sobre todo cuando varían poco las relaciones de re-

fraccion. El aceite esencial de limon, el de trementina, el ácido muriático, ya puro, ya saturado, de muriato amoniaco-mercurial, dispersan mas que el crownglass, y sin embargo, refractan menos que él, como hemos comprobado nosotros mismos. Otras muchas sustancias presentan la misma inversion, y asi las relaciones de las fuèrzas dispersivas de los cuerpos, con su composicion química, parecen mucho mas dificiles de preveer que las de sus fuerzas refringentes.

Juan Dollond, célebre óptico inglés, es el primero que ha comprobado por esperiencia el error de Newton sobre la posibilidad de obtener una compensacion acromática exacta, conservando un esceso de refraccion. Euler habia supuesto esta posibilidad, considerando que se verificaba en la construccion del ojo, que cuando está bien conformado reune, en efecto, en el fondo de la retina todos los rayos que refracta, y pinta en ella los objetos con sus colores propios, como se puede ver despojando de sus cubiertas la parte posterior de un ojo, y observando por detrás de la retina las imágenes que se forman en ella. Pero esta observacion sobre un órgano tan compuesto no basta para poner en claro los verdaderos principios de la compensacion de las dispersiones; y Euler propuso muchas leyes hipotéticas que hubieran producido este efecto. Esperimentando estas leyes, se vió Dollond conducido á repetir la esperiencia de Newton sobre la compensacion por medio de prismas de diferentes sustancias; y habiéndole llevado la casualidad ó una conjetura feliz á probar algunas muy diferentes, como el crownglass y el flintglass reconoció que la refraccion producida por el primero permanecia dominante, cuando los ángulos de los prismas eran tales que la coloracion se hallaba compensada sensiblemente. Estableciendo esta misma relacion entre los bordes prismáticos de las lentes cóncavas y convexas hechas de estas dos sustancias, Dollond

consiguió formar objetivos acromáticos, lo cual le proporcionó el poder aumentar considerablemente las aberturas que se habian empleado hasta entonces. Y aunque despues se ha hecho un grande uso de este descubrimiento, no se ha puesto el mayor cuidado en perfeccionarle, limitándose á seguir las relaciones de compensacion indicadas por Dollond, aun en casos en que no eran aplicables; y cuando se ha conocido la indispensable necesidad de separarse de ellas á causa de la gran diferencia de las sustancias, se ha suplido por medio de tanteos dispendiosos é imperfectos. Esta razon ha movido á MM. Cauchoix y Biot á buscar un método exacto para esto, tal como el que se ha esplicado antes.

CAPITULO IV.

De los instrumentos de dióptrica formados por el conjunto de muchos vidrios.

Los instrumentos de dióptrica mas compuestos pueden mirarse como formados esencialmente de dos vidrios. El primero, llamado *objetivo*, recibe inmediatamente la luz del objeto, y forma una imágen de él en su foco; el segundo, llamado *ocular*, se coloca cerca del ojo, y sirve para mirar esta imágen, que segun las distancias focales de ambos vidrios, y el lugar que se la dá, aparece recta ó inversa, aumentada ó disminuida. Esta primera disposicion se perfecciona formando el ocular con un sistema de vidrios combinados de un modo oportuno, y acromatizando el objetivo cuando es posible; entonces se obtiene mayor claridad y amplificacion, pero el principio es el mismo, y por consiguiente á este caso simple deben referirse todos los demas. Cualquiera que sea el número de los vidrios que componen un instrumento de dióptrica y su curvatura, es preciso que estén exactamente dispuestos sobre un mismo eje y sujetos de una manera sóli-

da á un tubo formado de varias piezas que puedan entrar unas en otras para variar la distancia del ocular al objetivo. Este tubo debe estar pintado de negro interiormente, á fin de que absorva toda la luz que pueda llegar oblicuamente á sus paredes; pues solo la que viene casi en la direccion del eje comun de las lentes puede ser útil para la vision. Asi para aislarla aun mas perfectamente se colocan en el interior del tubo diafragmas circulares pintados de negro, cuya opacidad detenga los rayos muy oblicuos, de suerte que en general todos estos instrumentos pueden considerarse como cámaras oscuras, cuyo interior es muy pequeño, y muy poco dilatado su campo. Esta última limitacion es indispensable por el aumento que quiere darse á la imágen, pues la desfiguraria demasiado si sus dimensiones fuesen muy pequeñas.

Cada instrumento está determinado á un objeto particular; unos sirven para hacer ver de cerca objetos muy pequeños aumentando mucho sus imágenes, y se llaman *microscopios*; otros están destinados á hacer ver los objetos distantes bajo un ángulo mucho mayor que á la simple vista y con igual claridad, los cuales se llaman *telescopios*. Los mismos principios teóricos abrazan todos estos casos; no hay mas que acomodarlos al objeto que se propone, introduciendo en ellos las particularidades propias de cada especie de instrumento. Esto es lo que vamos á hacer, considerando succesivamente los mas usados y útiles.

Del microscopio compuesto.

El objetivo de este instrumento es una lente pequeña A_1, fig. 121, de un foco muy corto, delante de la cual se colocan objetos pequeños $S\Sigma$ á una distancia A_1 P_1 ó S que sea un poco mayor que su distancia focal principal A_1 F_1. Detrás de esta lente se forma una imágen inversa f_1 φ_1 á una distancia A_1 P_1 ó S, mucho mayor que Δ, y si el tamaño de

$S\Sigma$ se espresa por I, el de $f_1\ \varphi_1$ será $I\frac{S}{\Delta}$; de suerte, que esta imágen es tambien mucho mayor que el objeto. Si quisiéramos limitarnos á este grado de amplificacion, se podria recibir la imágen en un vidrio esmerilado colocado en $f_1\ \varphi_1$, y observarla en seguida á la simple vista. Pero es claro que aun será mucho mayor el aumento si se arma el ojo con otra lente A_2, colocada de suerte que la imágen $f_1\ \varphi_1$ se halle un poco mas cerca que su distancia focal principal, pues asi resultará una segunda imágen igulamente inversa $f_2\ \varphi_2$, mucho mayor que $f_1\ \varphi_1$. En este caso no hay necesidad de vidrio esmerilado que absorveria una gran parte de la luz; porque los focos particulares cuya reunion formaba la imágen $f_1\ \varphi_1$, harán con respecto á la lente A_2 el efecto de otros tantos puntos radiantes mucho mas luminosos. De este modo se dispone el ocular A_2 en el microscopio compuesto. Las dos lentes estan colocadas á los estremos de un tubo cuyas partes pueden entrar mas en otras para variar el intervalo que separa los vidrios.

El aumento aparente es en este como en el microscopio simple igual á la relacion de las dimensiones absolutas del objeto $S\Sigma$ y de la última imágen $f_2\ \varphi_2$. Siendo, pues, todas las demas cosas iguales, crece á medida que ambas lentes tienen un foco mas corto. Disminuyendo la distancia focal A_1F_1 del objetivo, resulta mayor á igual distancia la imágen $f_1\ \varphi_1$ formada detrás de aquel vidrio: y por la diminucion de la distancia focal $A_2\ F_2$ del ocular, la imágen $f_2\ \varphi_2$ que resulta de $f_1\ \varphi_1$ se halla mas aumentada á la misma distancia á que se verifica la vision distintamente. El primer género de variacion tiene por límite la dificultad de construir de un modo regular lentes muy pequeñas, el mal efecto que produce el aumento de las incidencias y emergencias de los rayos en sus superficies; y en fin, la

escesiva diminucion de la luz que pueden recoger y transmitir. Pero aun es mas limitado el aumento que puede producirse por la diminucion de la distancia focal del ocular, en razon de la necesidad que hay de darle dimensiones bastante grandes. En efecto, siendo muy pequeña la superficie del objetivo, el hacecillo de luz refracta que proviene de cada punto del objeto es muy delgado, de manera que concentrado en uno de los puntos de la imágen $f_1 \varphi_1$, y volviendo á partir de este foco, se halla muy lejos de poder cubrir todo el ocular A_2, y solo cae en una parte muy pequeña de su superficie; de modo que si el ocular fuese tan pequeño que no le encontrase este hacecillo se perderia enteramente. El *campo del instrumento*, es decir, el espacio que puede comprender la vision á traves de las lentes que le componen, se halla, pues, terminado por los últimos rayos que encuentran los bordes del ocular; y por lo mismo no se puede disminuir este indefinidamente.

Tambien se puede, en razon de la sutileza de los hacecillos refractos, considerar el campo como terminado por aquellos hacecillos cuyos ejes $A_1 f_1$ $A_1 \varphi_1$ rasan los bordes del ocular. Los hacecillos mas oblicuos, de que solo una parte caeria sobre aquel vidrio, producirian poca luz para que haya de contar con ella en esta valuacion, tanto mas que se procura escluirlos por medio de un diafragma colocado entre los vidrios en el sitio en que se forma la imágen $f_1 \varphi_1$. Segun esto si SA_1 ΣA_1 representan los ejes de los hacecillos estremos, la estension del campo será igual al ángulo $SA_1 \Sigma$ ó $I_2 A_1 i_2$; será, pues, muy fácil calcularle, pues si llamamos h_1 el intervalo que hay entre ambas lentes y z_2 el radio $I_2 A_2$ de la segunda, la mitad de este ángulo ó $I_2 A_1 A_2$ tendrá por tangente trigonométrica la relacion $\frac{z_2}{h_1}$; de donde se podrá deducir el ángulo

por medio de las tablas trigonométicas.

Para que el ojo pueda abrazar toda esta estension es preciso que esté colocado en el punto O del eje á donde van á concurrir los hacecillos estremos emergentes, y en general todos los hacecillos sutiles que emanan de los diferentes puntos de la última imágen f_2 φ_2. Esto exije que la distancia de esta imágen al punto O sea precisamente igual á la distancia D á que se verifica la vision distinta. Cada observador consigue cumplir esta condicion segun su vista variando el intervalo h_1 que hay entre las dos lentes ó la distancia Δ del objeto, lo cual hace tambien variar el aumento producido por el microscopio, y el campo que comprende colocado el ojo en O en el punto conveniente descubre toda la estension del campo, y la descubriria aun cuando la pupila no tuviese sino una abertura infinitamente pequeña. Mas en este caso por poco que se separase de este punto, apénas percibiria mas que los rayos que viniesen por el eje, y desapareceria el campo; mientras que el tamaño sensible de la pupila hace mucho mas fácil la vision permitiendo que el ojo descubra todo el campo posible, aun cuando no se halle situado exactamente en el punto O.

Introduciendo las diferentes particularidades de esta construccion en las fórmulas generales que espresan la marcha de un rayo luminoso que atraviesa muchos vidrios esféricos colocados en un mismo eje, se obtiene la medida exacta de todos los fenómenos que acabamos de indicar; pero á falta de cálculo se pueden sacar estas medidas de la esperiencia. La estension del campo se determina inmediatamente trazando los límites del espacio visible. En cuanto al aumento, su medida exije algunos detalles de su construccion que vamos á presentar.

Generalmente se compone el cuerpo del microscopio de tres tubos que entran unos en otros. fig. 122. El superior GE, en donde se halla fijo el

ocular, y que se llama por esta razon *porta ocular*, entra bien ajustado en la pieza FC, que á su vez entra del mismo modo en la pieza inferior BA_1, en cuyo estremo inferior está colocado á rosca el objetivo A_1, y que por lo mismo se llama *porta objetivo*. Esto supuesto, se quita el porta-ocular GE, y se introduce en DD un diafragma circular de diámetro conocido; despues volviendo á colocar aquella pieza se baja hasta tanto que se vean claramente los bordes de este diafragma. Entonces se halla este colocado precisamente en el punto en que debe estar la imágen de los objetos formada por el objetivo para poderse ver distintamente. Por lo comun el sitio del diafragma está fijo en la pieza FC, y sacando ó metiendo el porta-ocular GE se establece la distancia conveniente entre el ocular y el diafragma, segun las diferentes vistas.

Es preciso saber tambien que delante del objetivo A_1 hay un anillo circular de metal doble SS, en el cual se colocan los objetos que se quieren ver con el microscopio, ó mas bien se colocan en una lámina de vidrio que se introduce en ambas partes de este anillo. El pie del instrumento está hecho de modo que se puede acercar ó separar el anillo SS al objetivo para poner los objetos á la distancia conveniente de este vidrio. Cuando se quiere medir el aumento, se coloca en el anillo en vez de objeto una lámina de vidrio, en que estan gravadas divisiones paralelas cuyo intervalo se conoce exactamente; como por ejemplo, de un décimo de milímetro. Este vidrio dividido se llama *micrometro objetivo*. Luego que está colocado se introduce la pieza FC hasta un punto fijo, y sin tocar al ocular se baja ó sube todo el cuerpo GFC del instrumento, hasta tanto que se vea con la mayor claridad la imágen de las divisiones trazadas en el micrometro objetivo. Esta imágen se halla entonces contenida en el diafragma DD, pues solo en este sitio pueden verse distintamente los objetos por medio del ocu-

lar. Se cuentan cuantas divisiones comprende, y suponiendo que sean m, siendo M el verdadero diámetro del diafragma, se seguirá que m divisiones aumentadas por el objetivo son iguales á M en tamaño. Asi el aumento producido por el objetivo á esta distancia del diafragma es $\frac{M}{m}$. Supongamos el micrometro objetivo dividido en décimos de milímetro, y el diámetro del diafragma igual á 10 milímetros. Conducido el instrumento á su verdadera posicion, comprenderá, por ejemplo, 20 divisiones paralelas, esto es, 20 décimos de milímetro que por el aumento dado por el objetivo vienen á ser 10 milímetros ó 100 décimos. Asi el aumento producido por el objetivo á esta distancia del diafragma será $\frac{100}{20}$ ó 5, de donde se sigue, que en general, la primera imágen $f_1\ \varphi_1$ sera 5 veces mayor que el objeto de que proviene.

El aumento de esta imágen, producido por el ocular, se calculará segun los principios que sirven para una lente sencilla por su distancia focal, y la distancia á que se verifica la vision distinta, invirtiendo la regla dada en el capítulo 2.º de la dióptrica; y el aumento total producido por el microscopio será el producto de estos dos aumentos parciales. Por ejemplo, si en la situacion en que se halla colocado el objeto se aumenta 5 veces por el objetivo solo, si es 10 el aumento de la imágen producido por el ocular, el aumento total sera igual al producto de 5 por 10, es decir, 50.

Cada proporcion de aumento determinada de este modo es particular de la distancia Δ á que se ha colocado el objeto delante del objetivo. Si se le acerca al foco principal F aumentara, y disminuirá si se le separa de él; pues la primera operacion hace producir la imágen $f_1\ \varphi_1$ mas lejos del objetivo A, y la segunda mas cerca de el. En ambos casos, si no se quiere tocar al ocular, bastará hacer mover

la pieza intermedia FC para alargar ó acortar el tubo, á fin de que la nueva imágen venga á formarse siempre entre los bordes del diafragma DD, hallándose asi á la distancia constante del ocular que conviene para formarse la vision de una manera distinta. En cada una de estas nuevas posiciones se puede repetir la determinacion del aumento del objetivo; pero esto no es necesario, pues el cálculo demuestra que respecto á una misma vista, los valores del aumento total son sensiblemente proporcionales á la distancia entre el objetivo y el ocular, menos la distancia focal de este último. Bastará, pues, medir estas distancias en la primera esperiencia en que la pieza intermedia FC se halla introducida hasta el punto fijo; y en seguida, trazando en el tubo una division de partes iguales que indique en los demas casos lo que alarga ó encoje aquella distancia, se podrá deducir el aumento del microscopio por la proporcion que acabamos de indicar. O bien, si se quiere, se podrán gravar estos aumentos en el mismo tubo, al lado de cierto número de divisiones bastante próximas, para que las intermedias puedan calcularse tomando simplemente medias proporcionales. Pero siendo estos valores compuestos del efecto del objetivo y del ocular, variarán con respecto á las diferentes vistas en proporcion á las distancias á que se produce claramente la vision, de manera que el mismo instrumento aumentará siempre mucho mas para los présbitas que para los miopes, como se verifica en los microscopios simples.

Arreglado una vez el microscopio como acabamos de decir, se le puede emplear para obtener las dimensiones absolutas de los objetos pequeños, pues los resultados que da no carecen de exactitud. Se pueden colocar estos objetos sobre el micrómetro objetivo, y observar con el microscopio cuantas divisiones cubren; pero el grueso de los objetos, por pequeño que se suponga, tiene una grande in-

fluencia sobre el sitio de su imágen, en razon á lo próximos que se hallan al foco principal del objetivo, de suerte que casi nunca se les puede ver con claridad por medio del ocular al mismo tiempo que las divisiones del micrómetro. Para remediar este inconveniente se coloca otro micrómetro en el interior del microscopio, en el punto preciso en que se forma la primera imágen, es decir, en el diafragma DD que corresponde al foco del ocular. Entonces se observa fácilmente cuántas divisiones ocupa en este micrómetro interior la imágen del objeto, y este número, dividido por el aumento que produce el objetivo por sí solo en su distancia actual á la imágen $f_1 \varphi_1$, es decir, al micrómetro, da el tamaño absoluto del objeto.

Todo esto ha sido realizado hace mucho tiempo por Mr. Charles. Los estrechos límites de este tratado no nos permiten esplicar todos los pormenores de las demas mejoras introducidas por este hábil observador; pero indicaremos algunas observaciones, sin las cuales es absolutamente imposible usar el microscopio.

Desde luego es indispensable iluminar fuertemente los objetos que se quieren observar; pues no siendo casi nunca luminosos por sí mismos, envian directamente pocos rayos, de los cuales solo un pequeño número entra en el microscopio, en razon á la poca abertura que puede darse á las lentes objetivas. Luego si se hubiera de limitar á recibir este poco de luz, las imágenes serian tan débiles, que apenas podrian percibirse, por poco que se dilatasen por el aumento: por cuya razon se iluminan fuertemente los objetos, reuniendo sobre ellos la luz ordinaria del cielo por la reflexion de un espejo poco cóncavo, ó la de una bugía por medio de un vidrio convergente. Si son opacos se les ilumina por encima; pero si son trasparentes se hace llegar á ellos por lo comun el hacecillo de luz por debajo; y digo por lo comun, porque hay casos en que es

mas ventajoso dirigir la luz de otro modo. Por ejemplo, cuando se quieren observar las divisiones del micrómetro objetivo para determinar el aumento, de ningun modo se ven mejor que iluminándolas con una reflexion oblicua, pues en este caso aparecen como pintadas de negro en la lámina en que estan trazadas. Hay micrómetros de estos que contienen hasta 900 divisiones visibles en la estension de una línea de pie de rey.

Otra precaucion indispensable es la de colocar en la parte interior del instrumento diafragmas, que limitando el campo, escluyan toda la parte de las imágenes que pudiera estar mal determinada, porque en todas las consideraciones anteriores hemos supuesto muy pequeñas las incidencias y emergencias, y no lo son en realidad, y tanto menos, cuanto mayor abertura se da á las lentes. Entonces la concentracion de los rayos en un solo foco, la formacion regular de las imágenes, su perfecta semejanza con el objeto, y todas las demas propiedades que se verifican en las inclinaciones muy pequeñas, no son sino aproximaciones de que se va separando al paso que es mayor la abertura de los vidrios. Por consiguiente es menester separarse lo menos posible de aquel supuesto, y esto se consigue limitando el campo por medio de diafragmas de diferentes diámetros segun la necesidad, pues este es un medio muy sencillo de separar de la imágen todo cuanto pudiera alterar la pureza de sus contornos.

Introduccion del vidrio intermedio. Construccion de los oculares acromáticos.

Una gran parte de las imperfecciones del microscopio proviene de la falta de acromatismo, la cual es tanto mas insoportable, cuanto mayor es el aumento que se quiere obtener. Por desgracia es imposible corregirlo enteramente, pues no hay que

pensar en acromatizar lentes tan pequeñas como las que exije el microscopio; pero se puede disminuir mucho por un medio que la observacion habia indicado á los prácticos antes de que la teoría hubiese esplicado su efecto, y hubiese enseñado á emplearle del modo mas ventajoso.

Este medio consiste en colocar en el interior del microscopio, y antes ó despues de la primera imagen $f_1 \varphi_1$, un tercer vidrio convergente de un foco determinado. Entonces la marcha de los rayos es la que representan las figuras 123 y 124. La primera disposicion, fig. 123, ha sido inventada por Campani, y la otra, fig. 124, por Ramsden.

El uso de este vidrio, que llamaremos *intermedio*, es general en todos los instrumentos de óptica. Su efecto evidente es reunir los hacecillos separados por el objetivo, concentrarlos en un espacio mas pequeño, hacer la imágen mas clara y mas reducida, y por consiguiente hacer ver con un ocular determinado una parte mayor del objeto. Pero tiene tambien otra utilidad mas oculta, que consiste en la influencia que ejerce sobre el acromatismo.

Cuando los rayos emanados de un objeto han sido refractados por un sistema cualquiera de lentes esféricas que forman imágenes de él al rededor de un eje AX, fig. 125, la diferente refrangibilidad de la luz hace que en general los focos de los rayos de diversos colores no se formen á la misma distancia; de suerte que si φ_1 es el foco de los rayos violados, φ_2 será el de los azules oscuros, φ_3 el de los azules celestes, y en fin, φ_7 el de los rojos; y por consiguiente, verificándose la misma propiedad respecto á los puntos radiantes que se hallan fuera del eje, se formará en φ_1 una imágen violada VV, en φ_7 una imágen roja RR, y en los puntos intermedios imágenes de los demas colores, y la misma causa que las coloca á diferentes distancias las dará tambien distintas dimensiones. Ahora bien, si se coloca el ojo en O en el mismo eje AX para observar estas imá-

genes, esperimentará desde luego el inconveniente de su diversa distancia, que le impedirá verlas todas á un mismo tiempo á la distancia que conviene para que la vision sea perfecta. Pero ademas será afectado de un modo desagradable por la diferencia de su tamaño, pues siendo unas mayores que otras presentarán los contornos de los objetos rodeados de fajas coloridas, ya rojas, ya violadas, ya de los colores intermedios, segun la que domine á consecuencia de las refracciones que hayan sufrido. Se conseguiria, pues, una gran ventaja si se pudieran arreglar de tal modo los tamaños de estas imágenes, que fuesen exactamente proporcionales á sus distancias al ojo, fig. 126, pues entonces este, viendo todos sus estremos en una misma línea recta V R O, recibiria á un mismo tiempo la sensacion de todas las especies de rayos, y por consiguiente desaparecerian las fajas de color. Esta disposicion, que parece deberá ser muy dificil de conseguir, es la cosa mas sencilla del mundo, y es precisamente el efecto que produce el vidrio intermedio cuando su distancia focal, y su posicion con respecto á los otros vidrios, estan determinadas de un modo conveniente. Mas esto no puede hacerse sino por medio del cálculo, y por consiguiente es imposible que presentemos aqui estas condiciones. Solo sí observaremos que la posibilidad de esta combinacion exije que haya en el instrumento á lo menos dos vidrios A_2 A_3 ademas del objetivo A_1, pues con este y un solo vidrio no se conseguiria acromatizar los bordes de la última imágen sino en una sola posicion del objeto. Asi, en todas las aplicaciones que hagamos de aqui adelante supondremos que *los oculares acromáticos deben siempre estar compuestos á lo menos de dos vidrios.*

El ocular acromático de Campani, fig. 123, es el que se emplea generalmente en los microscopios compuestos, y en todos los instrumentos en que no se quieren colocar hilos fijos sobre la imágen pro-

ducida por el objetivo. Pero cuando estos hilos son necesarios, como en los instrumentos astronómicos, á fin de fijar exactamente la direccion de los rayos luminosos que llegan al ojo desde aquel astro en un instante determinado, entonces no puede emplearse esta combinacion, porque al acercar ó separar el ocular para arreglarle á las diferentes vistas se harian mover necesariamente los hilos; y por poco que este movimiento los separase del eje del anteojo, los pasages sucesivos del astro no serian comparables entre sí. En este caso es perfectamente aplicable el ocular de Ramsden, fig. 124, puesto que estando enteramente situado mas allá de la primera imágen $f_1\ e_1$, puede acercarse ó retirarse sin mover los hilos que se hallan estendidos en el sitio donde aquella se forma. Así es que se emplea siempre en estas circunstancias, y con este objeto le ha inventado aquel célebre artista. Estudiando el efecto del ocular de Campani en los microscopios, ha hallado Mr. Cauchoix que es ventajoso dar al vidrio intermedio la forma de un menisco convexo hácia la lente objetiva. En cuanto al aumento producido por este instrumento, mas adelante esplicaremos el modo de determinarle por un método muy ingenioso que ha inventado Mr. Arago, y que es aplicable á todos los instrumentos de óptica. Se repetirá esta observacion en dos distancias diferentes del objeto al objetivo, lo cual adelantará ó atrasará la imágen, y obligará á hacer mover juntos los dos vidrios del ocular compuesto para conducirle al verdadero punto de la vision distinta. De este modo se obtendrán dos aumentos conocidos respecto á una prolongacion conocida del tubo; y su diferencia, repartida uniformemente entre todas las prolongaciones intermedias, darán los aumentos correspondientes que podrán gravarse en el tubo.

Con sola la inspeccion de las figuras 123 y 124 se ve que estos dos oculares dejan á los objetos la inversion que les ha dado el objetivo; pero em-

pleando mas de dos vidrios se les puede volver á su posicion natural, como veremos mas adelante, que es lo que se hace en ciertos casos con los anteojos que vamos á esplicar.

De los telescopios dióptricos.

Auméntese el objetivo del microscopio, y sepárese el objeto á una gran distancia, y se tendrá el telescopio dióptrico, que podrá componerse de dos, tres, ó mas vidrios. Solo sí, no teniendo ya la primera lente A_1 dimensiones muy pequeñas, podrá formarse de un conjunto acromático de vidrios puestos en contacto, lo cual dará una misma distancia focal á todas las imágenes coloridas. Es verdad que estas se separarán de nuevo al atravesar el ocular para llegar al ojo; pero ademas de que esta separacion será muy pequeña en razon del poco camino que tienen que andar, su efecto será enteramente insensible si los oculares estan dispuestos con arreglo á los principios del capítulo anterior, pues entonces las imágenes coloridas que se presenten al ojo, muy próximas unas á otras, tendrán al mismo tiempo dimensiones proporcionales á sus distancias, de suerte que su acromatismo aparecerá perfecto. Esto es lo que generalmente se hace.

La primera especie de anteojos y la mas sencilla de todas es la del astronómico, y está representado en la fig. 127. El objetivo A_1 es un vidrio convergente (y debe serlo siempre para formar imágenes detrás de sí y hácia el ojo); el ocular A_2 se supone tambien convergente, y la última imágen $f_2\,\varphi_2$ se presenta inversa.

Esta disposicion es exactamente parecida á la del microscopio de dos vidrios, fig. 121, sin tener mas diferencia que en el diámetro del objetivo A_1, de donde resultan hacecillos luminosos mas gruesos, y una acumulacion de luz mas considerable. Pero si se consideran los ejes de los hacecillos que entran

por el centro del objetivo, su marcha es exactamente la misma, y asi las condiciones que deben verificarse para que se produzca en el ojo la vision distinta son las mismas que anteriormente. Mas como los objetos se hallan en este caso muy distantes del objetivo, la imágen se forma detrás de este á una distancia casi invariable, que es la de su foco principal. Ademas, no permitiendo su gran separacion que se forme una idea exacta de su distancia, mientras su última imágen $f_2 \varphi_2$ se halla sin comparacion mas próxima al ojo, el aumento no se mide ya por las relaciones reales del tamaño y de su imágen, sino por la de los ángulos visuales $SA_1\Sigma$, $f_2O\varphi_2$, que uno y otra subtenden en el ojo cada cual desde el punto en que se halla colocado. Cuando el instrumento está compuesto solo de dos vidrios, esta relacion es sensiblemente igual á la distancia focal del objetivo dividida por la distancia focal del ocular, á lo menos cuando esta última puede suponerse muy pequeña con respecto á la distancia á que se verifica la vision distinta. Tal es, pues, entonces el valor del aumento; pero aqui, como en el microscopio, casi nunca se emplea el ocular simple á causa de la coloracion que produce en los contornos de la imágen última $f_2 \varphi_2$, aun cuando sean acromáticos el objetivo y la imágen $f_1 \varphi_1$. Si el instrumento está destinado á observaciones astronómicas, en que las únicas condiciones esenciales son la pureza de las imágenes y la abundancia de luz, se emplea el ocular compuesto de Ramsden ó el de Campani, que aunque no dan á la imágen la posicion recta, esto no tiene ningun inconveniente en este género de observaciones.

No sucede asi en los anteojos destinados á observar los objetos terrestres, y que por esta razon se llaman de *larga vista*. En estos es esencial que la última imágen colocada junto al ojo represente rectos los objetos, lo cual se consigue componiendo el ocular de cuatro vidrios separados, fig. 128, de

los cuales los dos primeros $A_2 A_3$, mas inmediatos al objetivo A_1, estan destinados únicamente á dar á la imágen la posicion recta, y los dos últimos $A_4 A_5$, situados junto al ojo, completan el acromatismo de los contornos, y tienen entre sí la misma relacion que en el ocular de Ramsden ó de Campani. El aumento producido por el anteojo depende de los focos de estos cinco vidrios y de sus intervalos, y dejando á los dos últimos colocados junto al ojo las distancias convenientes para el acromatismo de los bordes, se pueden hacer variar las posiciones de los otros entre ciertos límites, sin que el instrumento deje de producir un buen efecto; pero entonces el aumento varía, y se puede, solo por medio de este movimiento, hacerle pasar por todos sus trámites. Esto es lo que ha verificado Mr. Cauchoix en sus anteojos terrestres, á quienes por esta razon ha llamado *polialdos*, los que producen segun se quiera un aumento fuerte ó débil, circunstancia ventajosa, pues el primero conviene mas en los tiempos de niebla, y el segundo en los serenos. Los anteojos dispuestos de este modo, y destinados á poderse llevar de una parte á otra, varían su aumento de 20 á 40 veces ó de 30 á 50. El de los grandes anteojos astronómicos llega hasta 1200 veces y mas, aplicada esta evaluacion como las anteriores á los diámetros de los objetos. Mas á estos instrumentos no se les adapta el aparato polialdo, porque la multitud de reflexiones en los vidrios debilitaria demasiado la luz; y asi, cuando se quiere hacer variar el aumento, se cambia el ocular.

Tambien se construyen anteojos en que el objetivo, que siempre es convergente, está combinado con un ocular simple, pero divergente, fig. 129. Esta disposicion, inventada por Galileo, se usa aun para los anteojos de teatro, y presenta rectos los objetos.

En este caso, la primera imágen $f_1 \varphi_1$, producida por el objetivo A_1, no llega á formarse en rea-

lidad, aunque para la construccion de los resultados es preciso proceder como si existiesen. Antes del foco P_1, en que deberia formarse, se coloca el ocular divergente A_2 á una distancia tal, que la convergencia de los haccecillos hácia los puntos $f_1\ \varphi_1$ se cambie en divergencia desde otros puntos $f_2\ \varphi_2$ situados delante del ocular y á la distancia á que se verifica la vision distinta. Estos puntos forman entonces la última imágen, que es la que el ojo percibe. La separacion causada por el ocular á los ejes de los haccecillos que la componen hace que esta imágen aparezca recta, porque sus direcciones se cortan antes de llegar al ojo. Pero por lo mismo este no puede colocarse en el punto de interseccion O que cae en el interior del tubo del anteojo; y precisado á renunciar á esta ventajosa posicion, se coloca fuera en cualquier punto del eje de los vidrios, por ejemplo en O′, donde solo recibe la parte divergente de cada haccecillo que pasa por este sitio, bastante inmediato al eje A_1 X para poder entrar en la pupila. Por consecuencia de esta disposicion, al paso que el ojo se separa del punto de interseccion O, hay un número mayor de haccecillos, que separándose del espacio que abraza la pupila, vienen á perderse enteramente; y debiendo empezar esta desaparicion por los que mas se separan del eje, y forman los contornos de la imágen, resulta que el campo disminuye á medida que el ojo se separa. Asi la posicion de este, que presenta un campo mayor, es la de estar lo mas inmediato que sea posible al ocular. A pesar de estos inconvenientes, el uso de los oculares divergentes es muy útil para los anteojos de teatro por dos ventajas que ofrecen, una de hacer ver los objetos rectos, y otra de acortar la longitud total del anteojo, colocándose el vidrio mas acá del foco del objetivo. Se ha conservado á estos anteojos el ocular simple, que inevitablemente produce algun color, aun cuando el objetivo sea acromático, porque estando destinados á servir de co-

che en sitios que se hallen menos iluminados que por la luz del sol, los colores que pueden desenvolverse no son muy vivos, sobre todo cuidando de colocar la pupila en el eje, y porque se debilitaria demasiado esta luz si se les pusiesen oculares de muchos vidrios.

De los instrumentos formados por una reunion de espejos y lentes esféricas.

Todos los instrumentos de catóptrica que pueden imaginarse no son otra cosa que la reunion de espejos cóncavos ó convexos, dispuestos de modo que produzcan por reflexion imágenes distintas de los objetos que se observan con un ocular simple ó compuesto. De esta manera se pueden hacer microscopios y telescopios; mas aqui solo consideraremos este último genero de instrumentos, por no hallarse en uso los primeros; y aun nos limitaremos á esplicar su efecto en el caso mas comun, en que puede considerarse como infinita la distancia al objeto, pues fácilmente se verá que el método seria el mismo en los demas casos.

El mas sencillo de todos los telescopios es el que representa la figura 130, el cual está formado de un solo espejo cóncavo, que recibiendo los rayos que vienen de un objeto separado $S\Sigma$, forma en su foco una imágen de él $f_1 \varphi_1$, que se observa con un ocular simple para aumentarla. Pero en este caso, hallándose el observador interpuesto entre el espejo y el objeto, necesariamente detendria una parte de los rayos incidentes, por lo que esta disposicion no puede emplearse sino con espejos muy grandes; y para evitar cuanto sea posible la pérdida de luz se dirije el eje del instrumento un poco oblicuamente hácia el objeto, de modo que la imágen se forme fuera del eje, y solo la parte superior de la cabeza entre en el camino que deben seguir los rayos. En tal caso, si el espejo es muy

grande, la pérdida de luz es pequeña en comparacion de la que produciria un número mayor de reflexiones y refracciones. Mr. Herschell ha construido de este modo un gran telescopio de 40 pies de foco, con el cual ha hecho parte de sus descubrimientos. Otro semejante hay en el observatorio de Lilienthal en poder de Mr. Schroeter. La dificultad de mover tan grandes máquinas hace embarazoso su uso.

Despues de la construccion que acabamos de describir, la mas sencilla se debe á Newton, fig. 131, y consiste en colocar en el interior del telescopio y cerca de su foco principal F_1 un espejito plano, inclinado 45° sobre el eje, y cuyo tamaño es exactamente el necesario para recibir todos los rayos reflejos. Este espejo envia los rayos de lado, sin alterar en nada su convergencia, y no hace mas que colocar el foco perpendicularmente al eje, á la misma distancia á que deberia hallarse sobre su prolongacion. Al frente de esta nueva direccion se hace una abertura lateral en el tubo del telescopio para dejar pasar los rayos, y se observa la imágen con un ocular simple ó compuesto. Esta disposicion evita la interposicion directa del observador, y permite emplear espejos de todos tamaños; pero ocasiona una pérdida de luz considerable por la segunda reflexion que exije, sobre todo verificándose esta en una superficie metálica cuya fuerza de absorcion es siempre muy considerable. Asi en los telescopios de esta especie que Newton construyó, empleó para dirigir la imágen la reflexion interior en un prisma de vidrio rectangular, que tenia uno de sus lados perpendicular al eje del telescopio, figura 132.

La posicion del observador al lado del telescopio es incómoda cuando hay que buscar los astros que han de observarse, y es mucho mas ventajoso colocarse en la direccion misma del instrumento, lo cual se obtiene por la construccion de Gregory,

representada en la fig. 133. Consiste esta en sustituir al espejo plano un espejito cóncavo *m m*, que refleje los rayos que vienen del espejo grande y los vuelva á enviar hácia su centro, donde se hace una abertura para dejarlos pasar. Se forma, pues, detrás de esta abertura una imágen de los objetos en el foco compuesto de ambos espejos, la cual se mira con un ocular colocado en el eje. Si se suponen paralelos los rayos incidentes, la primera imágen se forma en F_1 en el foco principal del espejo grande, y hace oficio de objeto con respecto al segundo. Asi, segun lo que hemos demostrado en el capítulo 3.º de la catóptrica, es necesario que se halle entre su centro de curvatura y su foco principal para que la segunda imágen vaya á formarse mas allá de la primera hácia el observador.

Cassegrain modificó aun esta construccion sustituyendo al espejo cóncavo pequeño un espejito convexo *m m*, fig. 134, á fin de que las aberraciones de esfericidad producidas por ambos espejos se compensasen mútuamente. En este caso, para que la segunda imágen se forme á la parte del observador, es necesario que la primera no llegue á formarse realmente, sino que su sitio ideal caiga mas allá del espejo pequeño entre su foco principal y su superficie. Este resultado, que no hemos considerado en particular en el capítulo 3.º de la catóptrica por suponer rayos incidentes convergentes hácia el espejo, se demuestra con facilidad por el método general esplicado en el mismo capítulo.

Es casi superfluo decir que en estos telescopios los espejos se hallan sólidamente colocados en el eje de un tubo bastante largo para que no lleguen á su superficie sino rayos casi perpendiculares, y aun muchas veces se estrecha su abertura por medio de diafragmas, aunque no sea mas que para detener los rayos que caen á las orillas del espejo, que nunca estan tan bien trabajados como el centro. Los tubos deben estar pintados de negro por dentro co-

mo los de los anteojos para absorver mejor la luz què se refleja de un modo irregular en sus paredes; y en fin, deben estar colocados sobre pies que puedan girar de modo que se dirijan á la parte que se quierá del espacio.

Método general de Mr. Arago para determinar el aumento en los instrumentos de óptica.

Hemos dicho antes que en los instrumentos destinados á ver objetos distantes el aumento es igual á la relacion de los ángulos visuales con que se ve el objeto á la simple vista, y por medio del sistema de vidrios de que se compone el instrumento. Si el objeto se halla bastante próximo al ojo, para poder comparar su distancia en ambos casos es preciso combinar la relacion de los ángulos visuales con la de las distancias reales y aparentes del objeto, á fin de deducir la relacion de sus tamaños real y aparente, tomados uno y otro á la distancia á que se verifica la vision perfecta.

El método de Mr. Arago da inmediatamente la relacion de los ángulos visuales. Para esto se toma un prisma doble de cristal de roca, semejante á los que sirven para los micrómetros de dobles imágenes, cuya construccion hemos ya descrito, fig. 92, pero cuyo grueso sea muy pequeño, y no pase, por ejemplo, de un milímetro. Se mide el ángulo OCE ó C, bajo el cual divide la luz, lo cual se consigue con muchísima facilidad, como veremos, y en seguida se coloca detrás del ocular del instrumento que se quiere probar, y que supondremos que es un telescopio dióptrico ó catóptrico. Si se observa á través de este sistema una mira circular, distante y de un diámetro conocido, se verá doble, y sus dos imágenes estarán generalmente separadas una de otra. Separándose de ella ó acercándose hasta tanto que las dos imágenes se toquen por los bordes opuestos, cuando esto se verifique se podrá

estar seguro de que los rayos que salen de los bordes de la mira, despues de haber atravesado el instrumento, salen de él formando entre sí un ángulo exactamente igual á C. Ahora bien, puesto que se conoce el diámetro M de la mira y su distancia, que llamaremos Δ, se podrá calcular fácilmente el ángulo visual a, bajo el cual se cruzan los mismos rayos en su incidencia sobre el primer vidrio, porque $\frac{M}{\Delta}$ espresa su tangente trigonométrica. La relacion de estos ángulos ó $\frac{C}{a}$ espresará, pues, la relacion del aumento producido por el instrumento.

Para determinar exactamente el ángulo C se podrá observar la mira á la simple vista á través del doble prisma, y separarse ó acercarse á ella, hasta tanto que las dos imágenes se hallen en contacto, fig. 135. Entonces, conociendo el diámetro de la mira y su distancia actual, se calculará el ángulo visual que abraza, y este será el valor de C. Mr. Arago hace esta observacion con mas exactitud, mirando ambas imágenes con un anteojito, delante del cual, y en contacto con su objetivo, coloca el doble prisma, lo cual da mayor claridad sin alterar la coincidencia de las imágenes. Ademas, en vez de una sola mira coloca muchas de diferentes diámetros á la misma distancia, y aun las da una forma triangular para poder elegir en cada esperiencia sin necesidad de moverse el ángulo visual que corresponde al doble prisma, cuya amplitud quiere determinar.

El método de Mr. Arago se aplica tambien al microscopio, cualquiera que sea el sistema del ocular adaptado á él. Solo sí la observacion con el instrumento deberá hacerse en un objeto muy inmediato, y dividido en partes muy pequeñas como el micrómetro objetivo que hemos descrito antes. Cuando esté colocado delante de la lente objetiva, fig. 136,

á una distancia conveniente para poder ver con claridad por el objetivo la imágen de las divisiones trazadas en él, se colocará el doble prisma entre el ocular y el ojo, y dirigiendo el sentido de la doble refraccion perpendicularmente á la serie RR de las líneas trazadas en el vidrio, se observará cuál es el número RR′ de divisiones que comprende la separacion de los dos hacecillos, que supondremos que sea *m* milímetros. Este será, pues, el tamaño real del objeto que visto por el instrumento, y conducido por él á la distancia D á que se hace la vision perfecta, subtende en el ojo el ángulo constante C; su tamaño aparente, tal como le hace parecer el instrumento, será, pues, igual á la distancia D, multiplicada por la tangente trigonométrica del ángulo C, es decir, á D tang. C, espresion que podrá reducirse á $\frac{DC}{206265}$ suponiendo el ángulo C en minutos segundos. Solo faltará dividir este tamaño aparente por el tamaño real *m* del objeto como en el caso de un simple vidrio de aumento; y el cociente $\frac{DC}{206265\,m}$ espresará el aumento. Es inútil observar que las distancias D y *m* deben espresarse ambas en unidades de la misma especie.

De algunos aparatos que se emplean en las esperiencias de óptica.

Despues de haber descrito los instrumentos que sirven para aumentar el poder de la vista, vamos á decir alguna cosa de varios aparatos de óptica dignos de atencion por la belleza ó la singularidad de sus efectos.

La cámara obscura.

Un objetivo convergente colocado en el postigo de la ventana de un cuarto cerrado reune detrás de sí los rayos que vienen de los objetos esteriores; y si estos se hallan á mucha distancia con respecto á la de su foco, y colocados poco mas ó menos en la direccion de su eje, produce imágenes muy distintas que pueden recibirse en un carton blanco. Estas imágenes aparecen al reves, pero para ponerlas rectas basta hacer llegar al objetivo, en lugar de la luz directa de los objetos, su imágen refleja é invertida por un espejo de metal, fig. 137. Este aparato se llama *cámara oscura*; y se hacen algunas en que al carton se substituye un vidrio esmerilado, y el todo del aparato por una caja como representa la fig. 138; en cuyo caso se puede transportar, y sirve para dibujar paisajes.

Mr. Wollaston ha observado que la forma mas ventajosa que puede darse á los objetivos de las cámaras obscuras es la de un menisco convexo hácia la imágen, y cóncavo hácia los objetos, como se ve en las figuras; y algunas pruebas hechas por Mr. Cauchoix parece que indican que la relacion de las curvaturas mas favorables es la de 5 á 8, siendo la mas corta la de la superficie que mira á la imágen, puesto que el vidrio debe ser convergente.

El megáscopo.

Concibamos ahora un objetivo colocado en el postigo de una ventana, como antes, pero en vez de hacerle producir las imágenes de los objetos distantes coloquemos fuera del cuarto y á poca distancia en la direccion de su eje un objeto fuertemente iluminado por la luz del sol, ya directa, ya refleja por medio de varios espejos. Si este objeto no tiene demasiado grandes sus dimensiones, se formará

en el cuarto una imágen distinta de él, cuya separacion y tamaño dependerán de la longitud focal del objetivo y de la distancia á que se haya colocado el objeto delante de él. Se podrán, pues, obtener imágenes cada vez mayores aproximando mucho el objeto al foco principal; pero como de este modo las imágenes se separarian demasiado, es necesario limitarse á las distancias que permite el local, y detenerse cuando parezca que las imágenes han recibido un aumento suficiente, y aun se hallan bien terminadas. Estas aparecerán vueltas, pero se podrán conseguir rectas colocando al reves el objeto. Tal es el megáscopo, fig. 139. En vez de una sola lente objetiva se pueden emplear muchas, y acromatizarlas; en cuyo caso la estension en que las imágenes son claras, es bastante grande para poder formar copias en grande de un cuadro ó de una figura natural. Mr. Charles, que ha inventado este aparato, le hace aumentar de 2 á 20 veces.

La linterna mágica no es mas que un megáscopo portatil en que algunos objetos transparentes se hallan iluminados por la luz de una ó muchas lámparas. La fantasmagoría no es otra cosa que una linterna mágica en que se hace variar la distancia del objeto al vidrio convergente, y por consiguiente el tamaño de la imágen para producir la apariencia de un objeto que se acerca ó se aleja, pero para favorecer esta ilusion seria preciso hacer variar al mismo tiempo la luz que ilumina el objeto, de modo que disminuyese á medida que se alejára; pero justamente se verifica lo contrario en los aparatos de esta especie, en que se deja á la luz de la imágen la concentracion natural que la da el vidrio.

El microscopio solar.

En vez de un objetivo grande colóquese en un tubo ajustado á una ventana una lente A_2 de un

foco muy corto, fig. 140, delante de la cual se ponga un objeto pequeño $s\delta$ un poco mas allá de su distancia pricipal focal. Los rayos que nazcan de este objeto atravesando la lente irán á formar detrás de ella una imágen aumentada, cuyas dimensiones y distancia serán tanto mayores, cuanto mas cerca del foco se haya colocado el objeto. Asi, recibiendo esta grande imágen en un cuadro blanco colocado en el cuarto oscuro, se podrán examinar todos sus por menores; pero para que sea fácil hacer este exámen es necesario que la imágen sea aun bastante luminosa, á pesar de su dilatacion, para lo cual es preciso iluminar fuertemente el objeto. Con este objeto se coloca delante de él á la parte esterior otra lente A_1, fig. 141, á una distancia tal que concentre sobre el objeto un hacecillo de rayos solares dirigido por un heliostato; en cuyo caso, si el objeto es transparente, su imágen aparece muy luminosa. De este modo se pueden aumentar objetos pequeños, como animales microscópicos ú órganos de insectos en una proporcion enorme. Pero la aplicacion mas hermosa que se puede hacer de él es la de colocar en la laminita de vidrio que sirve de porta-objeto una gotita de alguna disolucion salina. En pocos instantes el líquido se evapora por el color, se verifica la cristalizacion, y se pueden observar en el cuadro todos sus trámites, asi como la configuracion de los cristales que se forman. El muriate de amoniaco y el sulfate de sosa producen este efecto con la mayor facilidad. La perfeccion de este aparato se debe tambien á Mr. Charles.

La cámara lucida.

Concibamos un prisma cuadrangular, fig. 142, trabajado de modo que los rayos que viniendo de los objetos distantes caigan poco mas ó menos perpendicularmente sobre su primera supecficie, sufran

dos veces la reflexion total en sus caras interiores, saliendo en seguida perpendicularmente á su última superficie, y llegando de este modo á un ojo colocado en O: este verá una imágen de los objetos recta y horizontal que le parecerá venir atravesando el prisma. Pero supongamos que coloca su pupila de modo que los rayos reflejos no ocupen sino la mitad de ella, de suerte que la otra, separada un poco fuera del prisma, pueda recibir los rayos que vengan directamente de un carton blanco AB colocado debajo; es claro que de este modo el espectador verá á un mismo tiempo y con un mismo ojo la imágen y el carton sobre el cual parecerá que se proyecta aquella. Luego si trata de seguir sus contornos con un lápiz bien afilado, verá al mismo tiempo la punta de este y la imágen, de modo que nada le impedirá el que pueda dibujarla. Si su vista lo exije, podrá ayudarle con un vidrio convergente ó divergente colocado delante del prisma. Este ingenioso instrumento ha sido inventado por Mr. Wollaston. Su uso puede aplicarse colocando detrás del ocular de un telescopio un espejo metálico inclinado y muy delgado, desde cuyo borde se mira con la mitad de la pupila, lo cual proporciona el poder dibujar objetos muy distantes.

Del órgano de la vista.

El órgano de la vista en el hombre es un instrumento de óptica compuesto de diferentes medios diáfanos, cuyas curvaturas y fuerzas refringentes stan combinadas de modo que las aberraciones de sfericidad y de refrangibilidad vienen á ser insen- les. Este aparato concentra los rayos luminosos ue vienen de los objetos, y produce sus imágenes re una tela nerviosa en que se verifica la sension que en seguida se transmite al cerebro. Para r una idea general de este admirable mecanismo

me valdré principalmente del *tratado de fisiologia* de Mr. Magendie, que le ha descrito con mucha claridad y exactitud.

Como un instrumento de óptica, por perfecto que sea, concentra siempre con mayor ventaja los rayos inmediatos á su eje, el ojo ha sido provisto de músculos sujetos á su voluntad, que le dirigen hácia los objetos que quieren verse. La misma prevision que le ha construido tan admirablemente le ha protegido de mil modos. Colocado en la parte anterior de la cara para dirigir los actos de los órganos del movimiento, está colocado en una cavidad rodeada de paredes huesosas que le defienden y rodean de masas grasientas, que le permiten ceder á la accion de los músculos que le dirigen sin que nada pueda herirle en sus movimientos. Para preservarse del contacto súbito de los cuerpos que pudieran dañarle tiene una especie de velos movibles que se estienden delante de él con la rapidez del pensamiento. Estos velos, llamados *párpados*, se hallan rodeados de pestañas que se oponen á la introduccion accidental de cualquiera polvillo que pudiera herir ó deslucir su superficie, y si alguno llega ó introducirse por casualidad, al momento varios órganos dispuestos espresamente para esto vierten lágrimas abundantes que le hacen salir á fuera. Estos mismos órganos en el estado habitual mantienen sobre la órbita del ojo una lijera humedad que le impide secarse por el contacto del aire, y que conserva el brillo de su superficie tan necesario para la seguridad de las refracciones. En fin, para que el sudor que el trabajo hace correr de la frente del hombre no venga á mojar é irritar sus ojos, la claridad que los contiene se halla guarnecida por la parte superior de dos arcos convexos de pelos algo duros, llamados *cejas*, cuya resistencia á la humedad se mantiene constantemente por una materia crasa que se secreta de su raiz.

Tales son las cubiertas del ojo. En cuanto al

mismo órgano estraido de su cavidad presenta poco mas ó menos la forma de un globo á que se hallan unidas varias venas y arterias que le alimentan, y músculos que le hacen mover. Si se abre de adelante atrás en la direccion de su eje, despues de haberle helado para consolidar todas sus partes, su corte interior ofrece la disposicion que representa la fig. 143 En él se distinguen tres medios de diferente forma y fuerza refringente. El primero AACC, empezando desde fuera es un menisco convexo-cóncavo lleno de un líquido diáfano semejante al agua en la apariencia, y que por lo mismo se llama *humor acuoso.* Despues de él se halla un cuerpo sólido transparente CC que tiene la forma de una lente convergente, y que se llama el *cristalino*, el cual es mas aplanado por la parte anterior que por la posterior, y se aplana cada vez mas con la edad. En fin, en toda la cavidad se encuentra un humor viscoso, semejante al vidrio fundido, que se llama *humor vitreo.* La cubierta que contiene todo este sistema puede considerarse como formada por la prolongacion y estension del nervio óptico N; el tegumento mas esterior da orígen á la cubierta NSA, que es dura, opaca, mas sin embargo flexible á manera del basta, lo cual ha hecho darla el nombre de *esclerótica* ó *córnea opaca.* Mas al llegar á A, delante del ojo esta membrana se adelgaza y se hace transparente como un vidrio de relox, para dar paso á la luz, y entonces se llama *córnea transparente*, y en este sitio se halla cubierta esteriormente por la piel, que es de una finura estrema. La segunda cubierta del nervio óptico se esparce por bajo de la primera, formando una capa llamada *choroida*, que está como barnizada con un licor negro; porque del mismo modo que nosotros pintamos de negro el interior de los tubos de nuestros anteojos, era necesario que lo estuviese el interior del ojo para evitar la confusion que resultaria de las reflexiones multiplicadas de los rayos. En fin, la

parte interior y medular del nervio óptico se ensancha tambien como las anteriores, y forma una membrana nerviosa RR, de un gris blanquizco, que se aplica á la choroida, y se llama *retina*, y en ella se cree que se produce la sensacion.

El método general con que obra este aparato es evidente por sí mismo, segun la descripcion anterior. Los rayos que vienen de los objetos distantes caen sobre la córnea transparente, atraviesan el humor acuoso, el cristalino y el humor vítreo, y van á concentrarse á la retina en el foco del instrumento, donde forman una imágen pequeña é inversa. Estos resultados pueden comprobarse en un ojo de hombre ó de buey estraido poco despues de la muerte; porque adelgazando la parte posterior de la esclerótica, y colocando á alguna distancia delante de la córnea un objeto luminoso, por ejemplo, la llama de una bugía, mirando por detrás se ve formar en el fondo del ojo una imágen muy clara del mismo color que el objeto, y que aumenta ó disminuye segun aquel se acerca ó se separa, como ha observado Mr. Magendie. Este fisiólogo ha indicado tambien un medio de hacer mas fácilmente la observacion valiéndose de ojos de animales albinos, como los conejos blancos ó ratones del mismo color, en los cuales no existe el barniz negro de la choroida, la parte posterior de la esclerótica es transparente, y se pueden ver inmediatamente las imágenes formadas en el fondo del ojo.

Mas no solo se forman estas imágenes, sino que todo está dispuesto para hacer perfecta su claridad y regularidad. Sabemos que todos nuestros instrumentos de óptica estan sujetos á dos imperfecciones que limitan estraordinariamente su campo y su poder: la una proviene de que los bordes de las lentes no concentran los rayos exactamente en el mismo punto que su centro, que es lo que se llama *aberracion de esfericidad*, y la otra proviene de que la misma lente concentra á mayor ó menor distancia

de su eje los rayos de diferente refrangibilidad, y la difusion de foco que resulta es lo que se llama *aberracion de refrangibilidad*. Respecto á esta, hemos visto que se consigue ya que no destruirla enteramente, á lo menos hacerla insensible en los anteojos, componiendo cada lente de varios vidrios de distinta naturaleza, cuyas fuerzas de dispersion sean desiguales y opuestas. Parece que el humor acuoso, el cristalino y el humor vítreo estan combinados de modo que produzcan una compensacion semejante, puesto que las imágenes que se forman en la retina estan teñidas de los mismos colores que los objetos de donde emanan. Pero ademas parece que la aberracion de esfericidad se halla igualmente compensada en la construccion del ojo, puesto que podemos ver con bastante claridad los objetos á una gran distancia angular al rededor de su eje, y aun mirándolos de lado, en cuyo caso los rayos de luz llegan muy oblicuamente á este órgano. Es posible que esta compensacion resulte en parte de la composicion del cristalino que vemos que está formado de una infinidad de capas distintas, cuyas fuerzas refringentes son probablemente desiguales. Ademas se reconocen en la disposicion del ojo distintas particularidades que evidentemente concurren á producir este mismo efecto. Tal es, por ejemplo, la existencia de un diafragma PP, colocado delante del cristalino, cuyo contorno opaco detiene los rayos que formarian un ángulo demasiado abierto con el eje. Este diafragma, visto desde fuera, presenta el aspecto de una corona circular de color, cuya tinta varía aun en el hombre, y se llama *iris*; y el agujero circular hecho en su centro, por donde los rayos de luz penetran dentro del ojo, se llama *pupila*. La construccion íntima de este diafragma y su disposicion no son menos maravillosas que el resto. Desde luego su superficie posterior, cubierta por la prolongacion de la choroide, está teñida de un hermoso negro; de manera que absorve todos

los rayos que reflejándose en la superficie interior del cristalino ó en el fondo del ojo, podrian repercutirse y alterar la oscuridad del aparato. Ademas, la membrana que le forma tiene sobre todos nuestros diafragmas artificiales la admirable ventaja de ser espansible, de modo que puede dilatarse ó contraerse para admitir mayor ó menor cantidad de luz, segun sea necesario. En fin, la colocacion misma de este diafragma en el interior del humor acuoso es una circunstancia perfectamente combinada, porque en la vision cada punto de los objetos visibles envia al ojo un cono de rayos de luz que tiene su cúspide en este punto, y por base toda la superficie esterior de la córnea transparente. Este cono, refractándose en el humor acuoso, se cambia en un cono mas corto, cuyo cúspide se halla en el interior del ojo, y entonces viéndose precisado á atravesar un pequeño agujero circular concéntrico al eje del órgano, fig. 144, pierde todos los rayos cuya oblicuidad primitiva de incidencia sobre la córnea hubiera producido una aberracion de esfericidad demasiado grande; y haciéndose esta esclusion favorable cerca del cúspide de estos conos, se verifica con igual éxito, cualquiera que sea la direccion de su incidencia, como manifiesta la figura. Supongamos que en vez de ser asi el diafragma, teniendo siempre una misma abertura, estuviese colocado fuera del ojo, en la misma superficie de la córnea transparente, fig. 145. Entonces produciria aun útilmente su efecto respecto á los conos incidentes muy próximos al eje; pero respecto á los conos oblicuos hubiera sido muy defectuoso, pues hubiera admitido los rayos mas distantes del eje, y mas oblicuos á la córnea, que son precisamente los que conviene escluir, y los que escluye el diafragma interior; de suerte que para obtener la misma esclusion dejándole fuera no hubiera habido otro remedio que hacer el agujero sumamente pequeño. La posicion del diafragma á la parte interior del

primer medio que ha refractado los rayos es, pues, el modo de admitir mayor cantidad de luz con menor aberracion de esfericidad. Sin duda por esta razon se halla colocado asi en un órgano negro cuyas partes estan todas construidas con tanta perfeccion; y aun nuestra arte tan grosera en comparacion de las obras de la naturaleza, ha empleado este mismo artificio probablemente sin pensar en esta semejanza; pues tal es exactamente la construccion de las lentes periscópicas, inventadas por el célebre Mr. Wollaston, las cuales estan compuestas de dos segmentos de lentes esféricas plano convexas, separadas por un diafragma en que se apoyan sus caras planas, fig. 146. La composicion de esta lente presenta ventajas indudables en cuanto á la cantidad de luz y la distancia del eje á que puede estenderse la vision.

Hay ademas en la construccion del ojo otras dos disposiciones que parece concurren á debilitar las aberraciones de esfericidad respecto á los hacecillos oblicuos: la primera es la forma particular de la superficie posterior del cristalino, que segun los dibujos dados por los anatómicos no es exactamente esférica, sino mas aplanada en el centro que hácia los bordes, lo cual hace que los hacecillos mas oblicuos la encuentren bajo menores incidencias. La otra es la concavidad de la retina, que va, por decirlo asi, á presentarse al foco propio de cada hacecillo.

En fin, aun admitida toda la maravilla de este mecanismo, su accion nos ofrece particularidades inesplicables. Nuestros instrumentos de óptica tienen distintas longitudes focales respecto á objetos separados ó próximos, y asi no podemos aplicarlos á diferentes distancias sino alargando ó acortando los intervalos de los vidrios que los componen. Es preciso, pues, que exista en el ojo algun mecanismo análogo, puesto que la vision se verifica con una gran claridad á distancias muy diferentes, por ejem-

plo, algunas pulgadas y algunos pies; y aun respecto á los objetos muy separados, la indeterminacion está muy lejos de ser comparable á la de un anteojo dispuesto para ver á cortas distancias. Se puede comprobar que es necesario un verdadero esfuerzo del ojo para variar asi su alcance, pues si se coloca á corta distancia de uno de los ojos un objeto pequeño, como un cabello, que se proyecte sobre otro objeto mayor y mas distante, no es posible ver ambos con claridad á un mismo tiempo, y es preciso un verdadero esfuerzo y aun un poco de tiempo para pasar de uno á otro. Sin embargo, la anatomia mas detenida no descubre en el ojo ninguna causa que pueda modificar en esta parte sus efectos. Se ha supuesto que la parte anterior de la córnea podia ponerse segun se quisiera, un poco mas cóncava ó mas convexa; pero esperiencias muy exactas de Mr. Th. Young han demostrado que no sufre ninguna alteracion sensible respecto á distancias muy diversas. Se ha recurrido tambien á un movimiento del cristalino adelante ó atrás, y á un cambio producido en su curvatura, pero no se halla ningun músculo que pueda producir este efecto, pues el cristalino no se halla adherido á ningun cuerpo que pueda moverle, sino que se halla suspenso en el centro de un anillo formado de fibras radiantes, llamadas *superciliares*, porque en efecto se parecen á las pestañas. No se sabe si pueden contraerse parcialmente, en cuyo caso podria el cristalino moverse en una direccion perpendicular á su eje; mas este movimiento no parece á propósito para hacer variar la distancia focal del ojo. El partido mas prudente es el de convenir en que hasta ahora ignoramos de qué modo puede el ojo modificar su accion respecto á las diferentes distancias. ¿Será acaso que la poca profundidad de este órgano haga imperceptibles las alteraciones de curvatura ó de distancia que pueda sufrir? ¿O se hallará compen-

sada la aberracion focal, respecto á diferentes distancias, por algun artificio particular?

Ultimamente, para manifestar de una vez la prevision con que está combinado este aparato maravilloso, diremos que en nuestros instrumentos de óptica, si se quita uno de los vidrios, al momento se destruye todo el efecto; pero el ojo, como los demas órganos de los sentidos, no parece tan fácil de descomponer. Si se taladra el ojo de un hombre vivo para hacer salir parte del humor acuoso ó del vítreo, como suele ser necesario en ciertas enfermedades, estos humores vuelven á formarse en poco tiempo. Si la pupila llega á cerrarse se puede abrir el iris por medio de una incision, y volver á formar de este modo una pupila artificial. En fin, si el cristalino mismo se obscurece, y es preciso quitarle para dar paso á la luz, se puede ver sin él, con la diferencia de que en este caso la distancia á que se ve bien es mucho mayor, como debe esperarse, despues de quitar del instrumento una lente convergente; pero se suple colocando delante del ojo un vidrio de una curvatura conveniente, y entonces se ve casi con igual claridad que cuando existia el cristalino. Esta estabilidad parece un carácter general de todos los órganos de los sentidos.

Hasta aqui solo hemos considerado el mecanismo con que se forma la vision: sus relaciones con la sensacion ofrecen un misterio aun mas inesplicable. Todo lo que sabemos es que la impresion producida en la retina se transmite al nervio óptico, y de este al cerebro. Respecto á sentir la sensacion de los objetos rectos, siendo asi que está inversa la imágen que se forma en el fondo del ojo, no es cosa que deba sorprendernos, pues la imágen, causa de la sensacion, no debe confundirse con la sensacion misma. Los rayos de luz refractados por los tumores del ojo tienen al llegar á la retina direcciones muy diferentes de las que tenian al llegar

de los objetos á la córnea, y sin embargo, con el pensamiento referimos siempre los objetos á esta direccion primitiva. Esto proviene de que la esperiencia de toda nuestra vida nos ha enseñado á hallar los objetos en esta direccion; y este resultado esperimental se une á la sensacion como una consecuencia constante que nuestra alma deduce instantáneamente. Asi se la puede engañar, presentándola artificialmente los mismos indicios sin que provengan de objetos reales; de este modo los objetos vistos por reflexion en un espejo plano parece que estén mas allá de su superficie, á pesar de que el raciocinio y la esperiencia, pero una esperiencia posterior á la primera educacion de nuestros sentidos, nos convence de nuestro error. Este principio da una esplicacion sencilla y natural de todas las ilusiones de óptica producidas por vidrios ó espejos.

Cuando se miran los objetos con un solo ojo, y no se está prevenido acerca de su distancia, se les supone en el cúspide del cono luminoso que tiene por base la abertura de la pupila, y por cúspide cada punto del objeto. Por lo mismo esta valuacion no tiene exactitud sino cuando los objetos se hallan á una distancia tan corta que sea sensible el ángulo de divergencia de los rayos que forman el cono. Cuando miramos á un mismo tiempo con ambos ojos, el mismo principio nos hace suponer los objetos en el punto de concurso de los hacecillos que llegan á cada ojo, y que son los cúspides comunes de los conos que acabamos de hablar. En este caso la base que sirve para medir la distancia es el intervalo de los dos ojos, y por consiguiente es mas considerable que en el caso anterior. Asi es que la valuacion tiene mucho mayor exactitud, como puede comprobarse por la dificultad que se encuentra para enebrar una aguja mirando con un ojo solo, siendo una cosa tan fácil cuando se mira con los dos. Sin embargo, para ver sencillas las imágenes, es preciso que ambas caigan en los puntos de la re-

tina en que estamos acostumbrados á verlas corresponderse cuando vienen de un mismo objeto. Si se oprime un poco con el dedo el estremo de un ojo, al momento se ven dos imágenes, una en el mismo sitio en que se hallaria la imágen sencilla, y otra separada en la direccion misma en que se ha oprimido el ojo; pero si se deja subsistir algun tiempo esta presion, la imágen secundaria va debilitándose, desaparece al fin, y vuelve á verse de nuevo la imágen simple en el mismo sitio que anteriormente.

La esperiencia demuestra que cuando estas presiones se ejercen con fuerza, escitan en el nervio óptico conmociones de que resulta la sensacion de la luz; y esta sensacion puede tambien escitarse ó estinguirse por comparacion. Por ejemplo, si se fija por mucho tiempo el ojo en un espacio estenso y teñido de un color uniforme, parece que en seguida, dirigiéndose á cualquiera otro objeto, prescinde del color á que ha mirado; y entonces se ve sobre estos objetos una mancha cuyo color es *complementario* de aquel en que se fijó el ojo al principio, es decir, que se compone de los rayos del objeto que no hacen parte de este color. Estas apariencias, producidas por contraste, se conocen con el nombre de *colores accidentales.*

Tambien se observan algunas veces en los objetos luminosos ilusiones de otra especie; á saber, bandas teñidas de los colores de arco iris ó aureolas radiantes de hacecillos divergentes. Estos efectos son producidos por la descomposicion de la luz en las gotitas húmedas que se hallan por casualidad entre las pestañas, y por la difraccion que estas ejercen sobre los rayos de luz á causa de su finura.

Este mecanismo de la vision, que tan maravilloso es en el hombre, está muy lejos de ser el único La naturaleza, al aplicarle á las diferentes clases de animales, ha variado sus pormenores, ya suprimiendo partes que serian inútiles en las circunstancias en que debian vivir estos animales, ya aña-

diendo otras particularidades mas acomodadas á estas circunstancias. Otras veces, en fin, ha seguido un plan enteramente nuevo, cuyos motivos nos son enteramente inesplicables, y sobre lo cual citaremos un corto número de resultados generales estraidos de las lecciones de anatomía comparada de Mr. Cuvier.

Todos los animales de sangre roja, tienen dos ojos formados bajo el mismo plan que los del hombre, pero con modificaciones mas ó menos considerables.

Entre los cuadrúpedos, un gran número tienen la pupila durante el dia en forma de una hendidura longitudinal, mas por la noche su iris se contrae, la pupila se ensancha, haciéndose circular, y adquiere una abertura mucho mayor. Tales son el buey, el caballo, el gato &c. Por esta razon, pudiendo estos animales concentrar proporcionalmente muchos mas rayos luminosos que el hombre, ven mucho mejor que él en la obscuridad.

Otro tanto sucede en las aves que buscan de noche su presa, como los buhos, los mochuelos &c. Generalmente el ojo de las aves ocupa una parte considerable del volúmen de su cabeza, y presenta algunas modificaciones importantes. Su cristalino, casi gelatinoso, es mucho mas plano que el del hombre, pero en recompensa su córnea es mucho mas convexa y proporcionalmente mas pequeña, como debe ser para evitar el aumento de aberracion de esfericidad que naceria de su aumento de curvatura. Esta pequeña córnea, muy convexa, está colocada al estremo de un cono muy corto que sale del ojo, como el tubo de un anteojo pequeño, fig. 147. En estas aves, lo mismo que en el hombre, ignoramos por qué medio se adapta el alcance de la vista á las diferentes distancias. Sin embargo, ¿qué estension no debe tener esta variacion el ojo de una ave rapiña, que desde lo mas elevado del aire distingue el animalillo sobre quien va á arrojarse, le

encierra en los vastos círculos de su vuelo, se acerca á él poco á poco, y cayendo en seguida con la rapidez del rayo, le asegura en sus garras al mismo tiempo que dirige sobre él la vista? El interior del ojo de las aves contiene un órgano particular destinado acaso á este uso, fig. 148. Es una especie de velo negro, formado por una membrana de la naturaleza de la choroida, y plegado como un abanico, con la diferencia de que sus pliegues en vez de terminar en un mismo centro, parten de los diferentes puntos de un tronco comun, que es la prolongacion del nervio óptico por el interior del ojo aplicada á su concavidad. La direccion de esta membrana es oblicua al eje del ojo, y flota dentro del humor vítreo estendiéndose casi hasta detrás del cristalino, al que algunas veces parece estar unido por medio de un filamento que liga los estremos de sus plieges. Segun su naturaleza vasculosa y el número de vasos sanguíneos que la cubren, seria tal vez posible que estuviese destinado á estender por medio de su dilatacion la cavidad posterior del ojo, y á aflojarse comprimiéndose, de modo que cambiase con su presion la curvatura del cristalino ó su distancia á la retina, para acomadarla á las diferentes distancias de los objetos.

El ojo de los peces, fig. 149, presenta tambien diferentes particularidades. Debiendo estos animales vivir en un medio cuya fuerza refringente es casi igual á la del humor acuoso del ojo del hombre, les hubiera sido inútil este fluido. Asi en su ojo está sustituido por un ligado viscoso verosimilmente mas refringente que el agua pura, y que se halla en muy corta cantidad. Por una consecuencia necesaria su pupila está muy inmediata á la córnea, lo cual la quita una parte de las ventajas que tiene en el hombre; pero estas ventajas les son mucho menos necesarias á causa de la poca refraccion que sufren los rayos al pasar del agua á los humores del ojo. Ademas, la pupila de los peces no es

dilatable, y su íris tiene comunmente por la parte de afuera los colores mas vivos, aunque siempre es negra por la de adentro. El cristalino, aplicado casi inmediatamente á la cornea, es casi esférico. Ignoramos absolutamente por qué la naturaleza le ha dado esta forma; pero parece que es á propósito para la vision en el medio líquido en que viven los peces, pues se halla tambien en la mayor parte de las aves acuáticas. Por lo demas se halla compuesto de capas concéntricas como el de los otros animales.

En fin, para acabar de trastornar nuestra inteligencia hay animales, cuyos ojos en mayor ó menor número estan formados solo de una cornea trasparente y lenticular, detrás de la cual van á ensancharse varios filamentos nerviosos; tales son los insectos. Algunas veces sus ojos son lisos y aislados; otras veces estan como tallados en facetas; pero la diseccion manifiesta que en este último caso cada faceta es un verdadero ojo, que tiene su cornea y su filamento nervioso particular, nacidos todos de un tronco comun. Por esta razon han dado á esta última especie de ojos el nombre de compuestos, y el de lisos á la primera, aunque parece que hubiera sido mas natural dividirlos en ojos simples y multiplos. Unos y otros se hallan siempre fijos en los insectos, y cada uno no hace ver mas que los objetos que vienen á colocarse por sí mismos en la estension del campo que abraza. Es imposible concebir cómo un aparato semejante puede producir imágenes distintas; mas sin embargo, es indudable que sirve esencialmente para formar la vision; porque si se cubren los ojos de los insectos con un barniz negro, de tal naturaleza que no pueda destruirlos, se conducen enteramente como ciegos, y no saben evitar ninguno de los obstáculos que se presentan en su camino. Por oposicion á estos ojos multiplos hay clases enteras de animales que carecen absolutamente de ellos; tales son los moluscos

acéfalos, los zoófitos y los gusanos.

Para acabar estos pormenores haremos una reflexion. Hay muchos animales que ven en una oscuridad que para nosotros seria profundísima. No hay duda que los gatos y los mochuelos ven su presa de noche, puesto que la dan caza y se apoderan de ella. Los peces que viven en los abismos del mar á dos ó tres mil pies de profundidad se hallan en una noche aun mas completa, pues no pueden recibir sino cantidades muy débiles de luz á través de la inmensa capa de agua que los cubre. Sin embargo, es seguro que ven su presa, que la siguen con certeza y que la atacan con ímpetu; mas todos ellos tienen ojos grandísimos, del mismo modo que los gatos y las aves nocturnas. ¿No seria posible que en estos animales la vision fuese producida por rayos que respecto á nuestros ojos solo serian calórico? Mas adelante veremos al tratar de las relaciones de la luz y el calórico que esta idea no carece de verosimilitud.

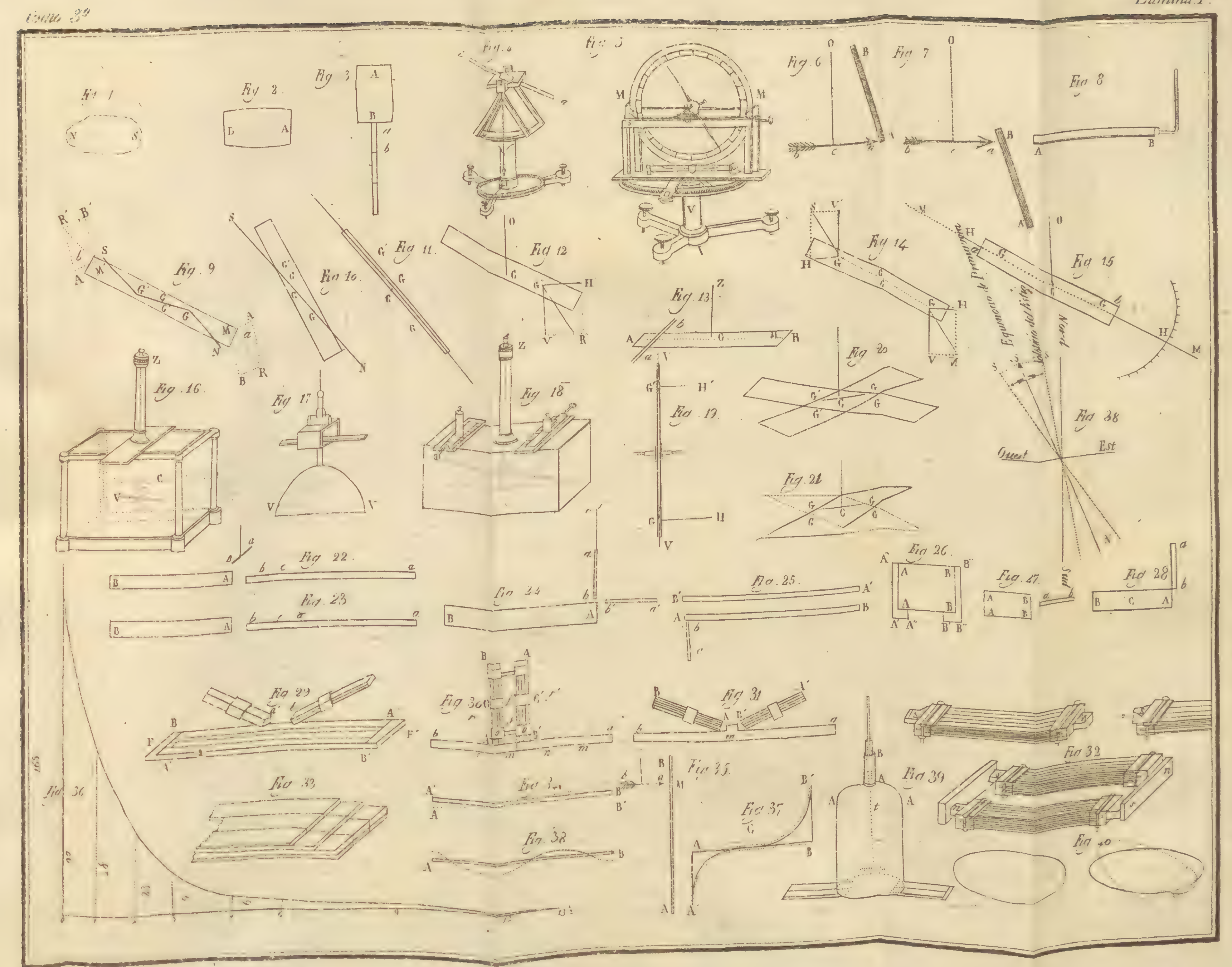
FIN DEL TOMO TERCERO.

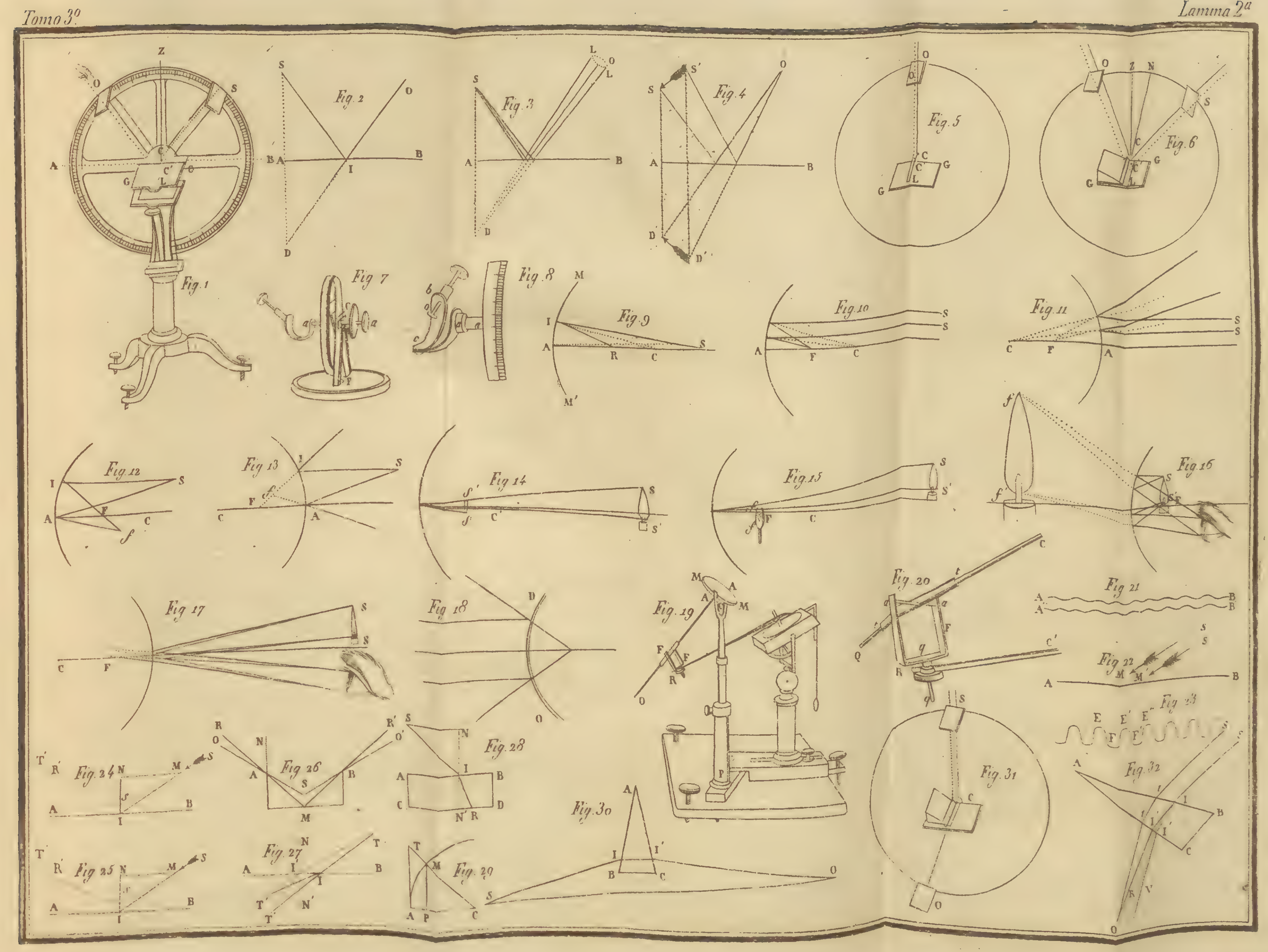
TABLA

DE LOS LIBROS Y CAPÍTULOS QUE CONTIENE ESTE TOMO.

LIBRO V. CAP. I. *Fenómenos generales de las atracciones y repulsiones magnéticas.* . . . Pág. 5
Cap. II. *Consideraciones generales sobre el desenrollo del magnetismo en las barras magnetizadas; su analogía con las pilas eléctricas.* 17
Cap. III. *Determinacion y medida de las fuerzas directrices ejercidas por el globo terrestre sobre las agujas magnetizadas.* 21
Cap. IV. *Diferentes modos de magnetizar.* . . 35
Cap. V. *Distribucion general del magnetismo libre en los hilos magnetizados por el método del doble toque. Leyes de las atracciones y repulsiones magnéticas.* 58
Cap. VI. *Investigaciones acerca de la intensidad del magnetismo libre en cada punto de una aguja magnetizada hasta la saturacion por el método del doble toque.* 61
Cap. VII. *De la mejor forma que puede darse á las agujas de las brújulas.* 68
Cap. VIII. *De la accion de los imanes sobre todos los cuerpos naturales.* 72
Cap. IX. *Leyes del magnetismo terrestre á diferentes latitudes.* 74
LIBRO VI. *De la luz. Consideraciones generales.* 90
CATÓPTRICA. Cap. I. *Leyes generales de la reflexion de la luz.* 96
Cap. II. *Del espejo plano* 99
Cap. III. *De los espejos curvos.* 105
Cap. IV. *Del heliostato.* 112
Cap. V. *Consideraciones generales sobre las fuerzas que produce la reflexion de la luz en las superficies de los cuerpos.* 114
DIÓPTRICA. Cap. I. *Leyes generales de la*

refraccion simple. 125
Cap. II. *De las lentes esféricas.* 141
Cap. III. *Teoria física de la refraccion.* 164
Cap. IV. *De la doble refraccion.* 199
Cap. V. *Distincion de los cristales atractivos y repulsivos. Construccion de los micrómetros de imágenes dobles.* 216
ANALISIS DE LA LUZ. CAP. I. *De la dispersion de la luz producida por la refraccion.* . . 230
Cap. II. *Influencia de la diferente refrangibilidad de los rayos en la vision á través de las superficies refringentes.* 262
Cap. III. *Del acromatismo.* 272
Cap. IV. *De los instrumentos de dióptrica formados por el conjunto de muchos vidrios.* 282


Fig. 1
Fig. 2
Fig. 3
Fig. 4
Fig. 5
Fig. 6
Fig. 7
Fig. 8
Fig. 9
Fig. 10
Fig. 11
Fig. 12
Fig. 13
Fig. 14
Fig. 15
Fig. 16
Fig. 17
Fig. 18
Fig. 19
Fig. 20
Fig. 21
Fig. 22
Fig. 23
Fig. 24
Fig. 25
Fig. 26
Fig. 27
Fig. 28
Fig. 29
Fig. 31
Fig. 32
Fig. 33
Fig. 35
Fig. 36
Fig. 37
Fig. 38
Fig. 39
Fig. 40
Nord
Sud
Est
Ouest


Fig. 1
Fig. 2
Fig. 3
Fig. 4
Fig. 5
Fig. 6
Fig. 7
Fig. 8
Fig. 9
Fig. 10
Fig. 11
Fig. 12
Fig. 13
Fig. 14
Fig. 15
Fig. 16
Fig. 17
Fig. 18
Fig. 19
Fig. 20
Fig. 21
Fig. 22
Fig. 23
Fig. 24
Fig. 25
Fig. 26
Fig. 27
Fig. 28
Fig. 29
Fig. 30
Fig. 31
Fig. 32

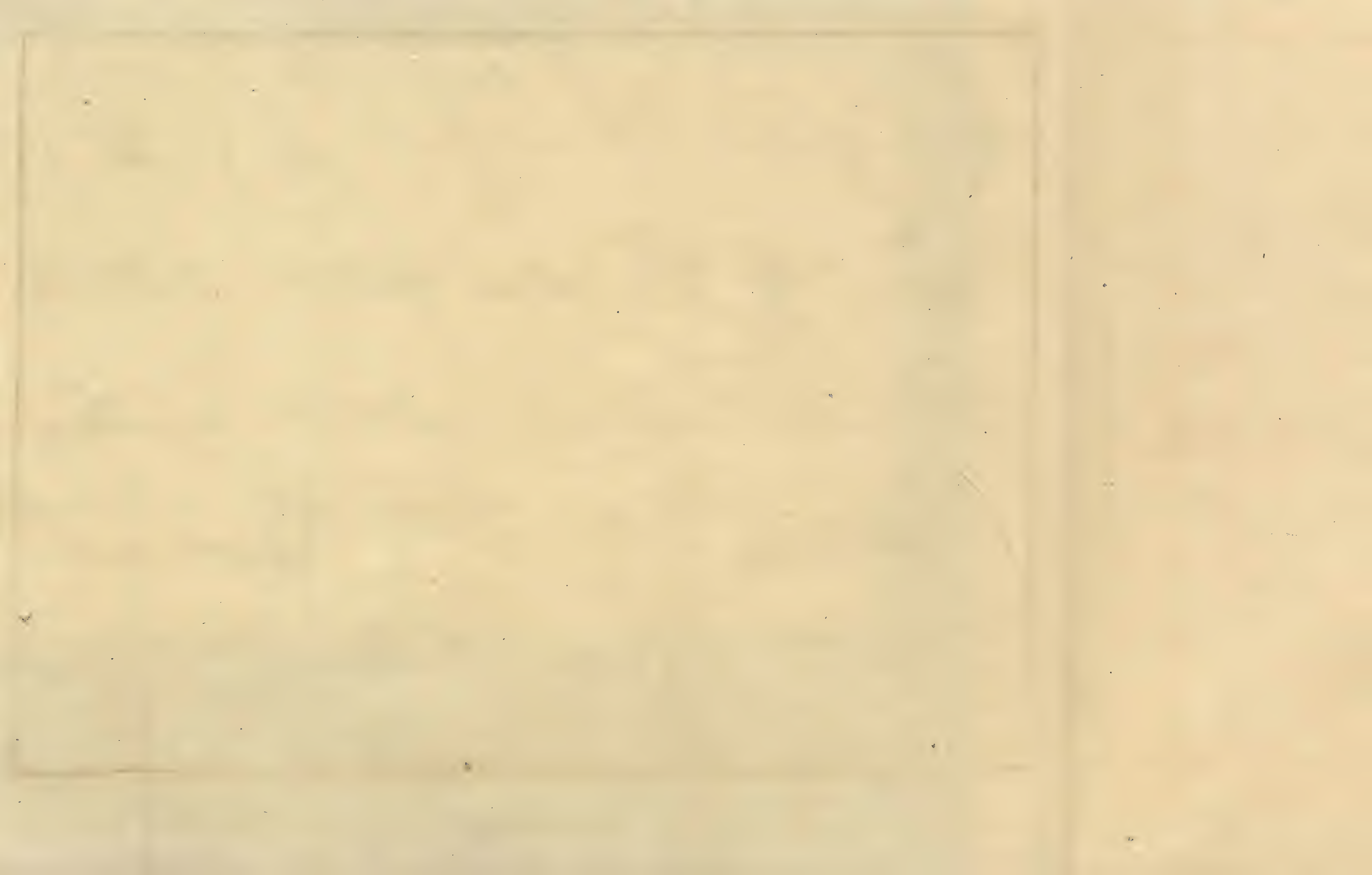
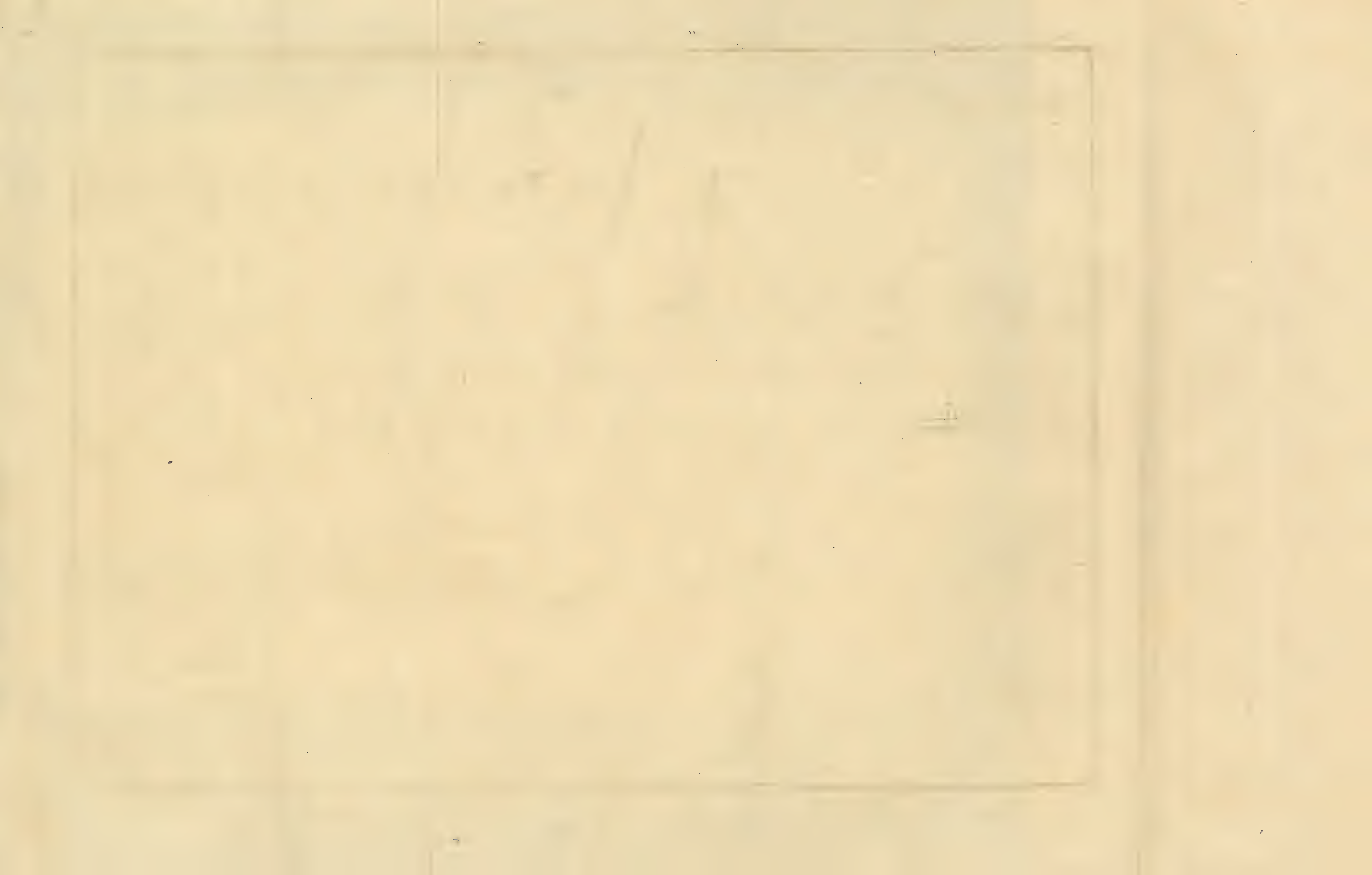


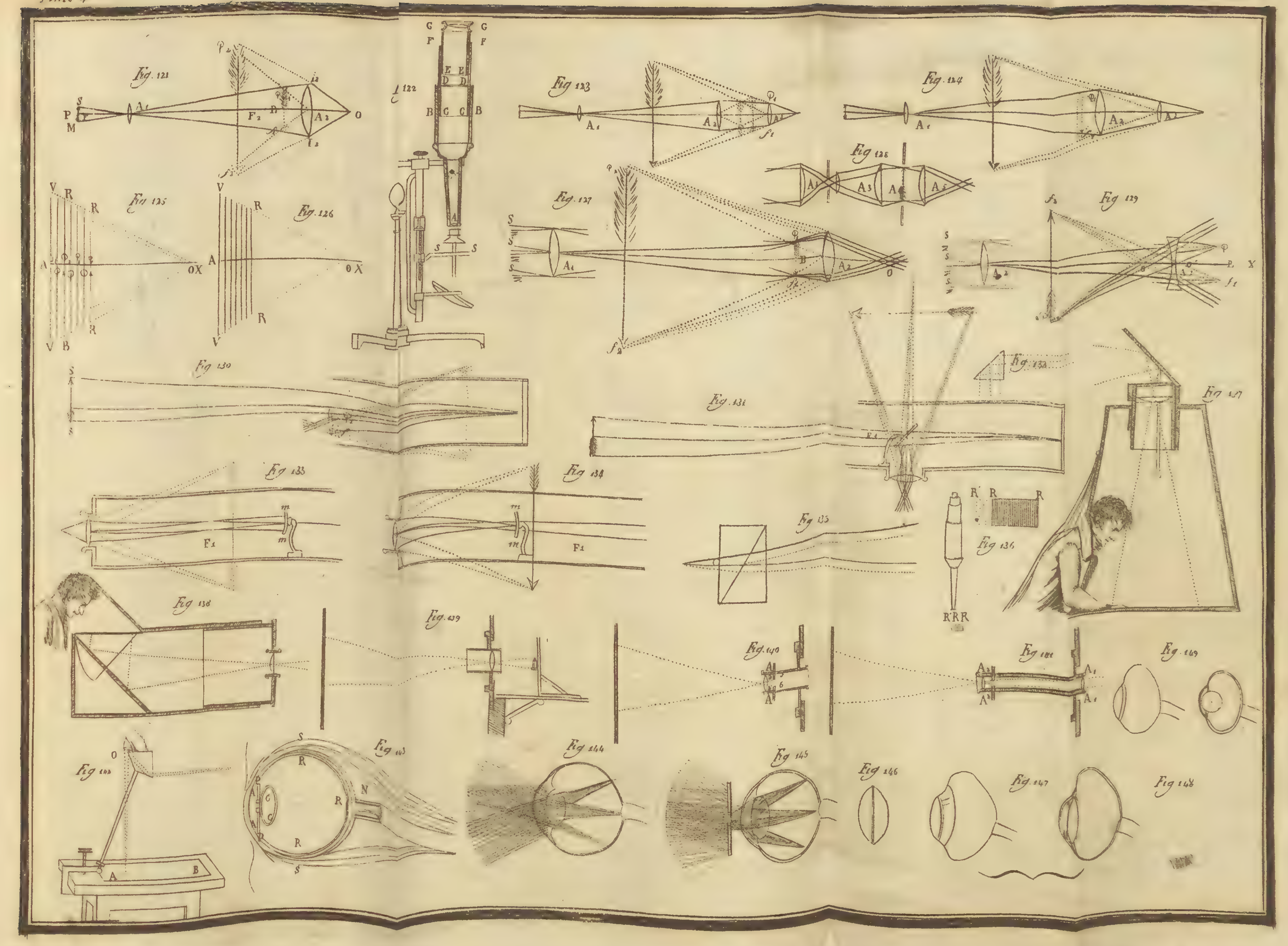
Fig. 33 Fig. 34 Fig. 35 Fig. 36 Fig. 37 Fig. 38 Fig. 39 Fig. 40 Fig. 41 Fig. 42 Fig. 43 Fig. 44 Fig. 45 Fig. 46 Fig. 47 Fig. 48 Fig. 49 Fig. 50 Fig. 51 Fig. 52 Fig. 53 Fig. 54 Fig. 55 Fig. 56 Fig. 57 Fig. 58 Fig. 59 Fig. 60 Fig. 61 Fig. 62 Fig. 63 Fig. 64 Fig. 65 Fig. 66 Fig. 67 Fig. 68 Fig. 69 Fig. 70



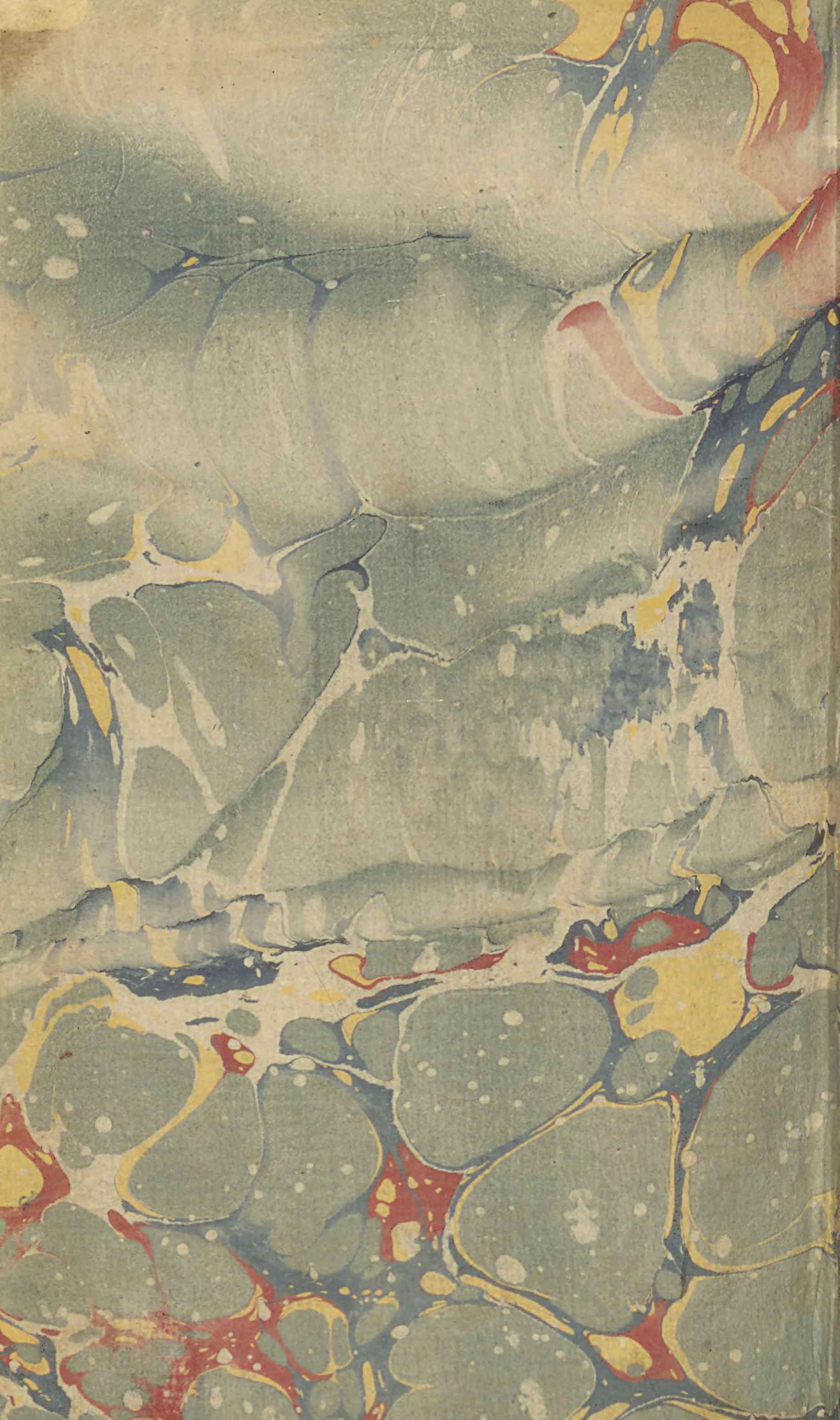
Fig 71 Fig 72 Fig 73 Fig 75 Fig 74 Fig 76 Fig 77 Fig 78 Fig 79 Fig 80 Fig 81 Fig 82 Fig 83 Fig 84 Fig 85 Fig 86 Fig 87 Fig 88 Fig 89 Fig 90 Fig 91 Fig 92 Fig 93 Fig 94 Fig 96 Fig 95 Fig 97 Fig 98 Fig 99 Fig 100 Fig 101 Fig 102 Fig 103 Fig 104 Fig 105 Fig 106 Fig 107 Fig 108 Fig 109 Fig 110 Fig 111 Fig 112 Fig 114 Fig 115 Fig 116 Fig 117 Fig 118 Fig 119 Fig 120

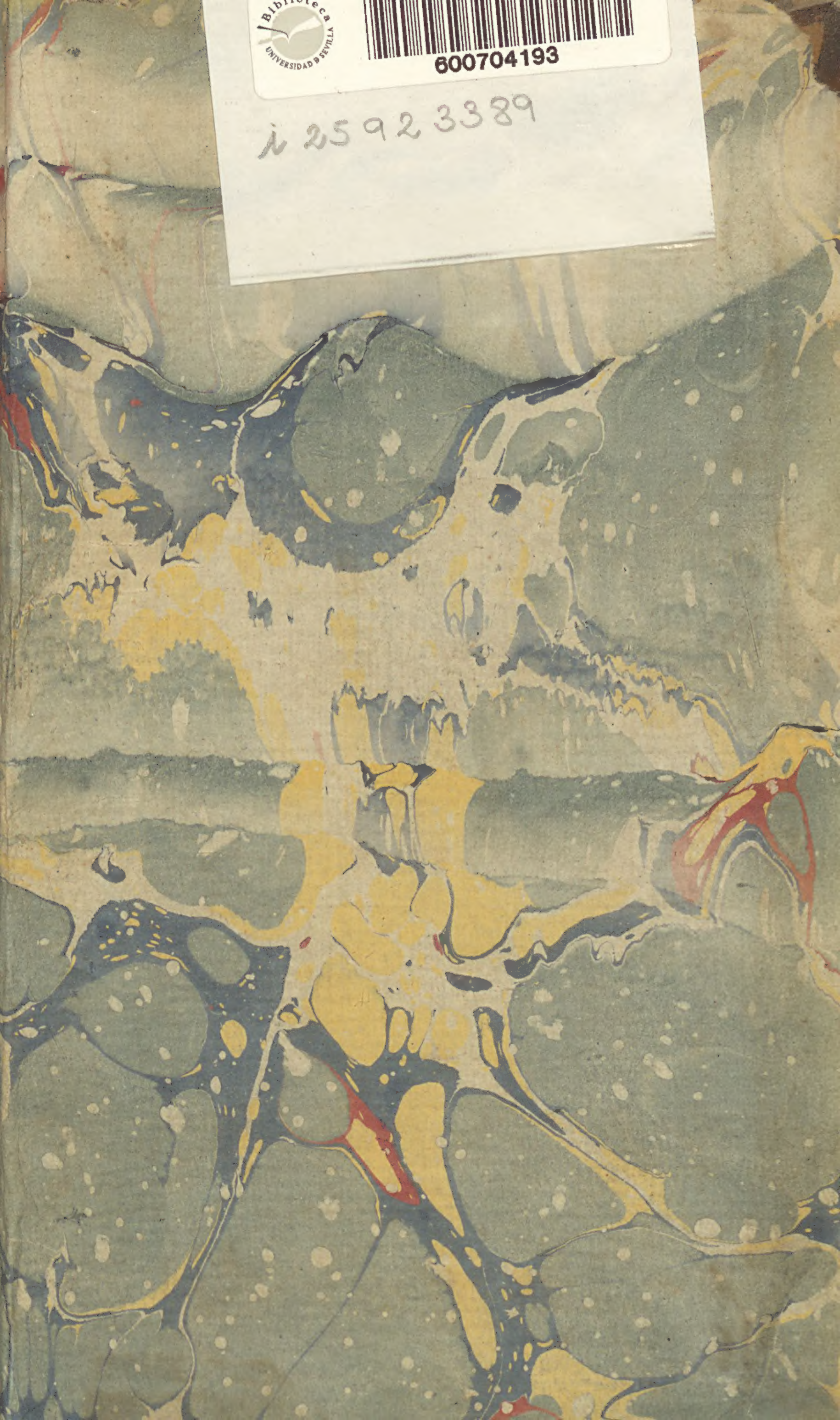
Encarnado Anaranjado Amarillo Verde Azul Indigo Violeta



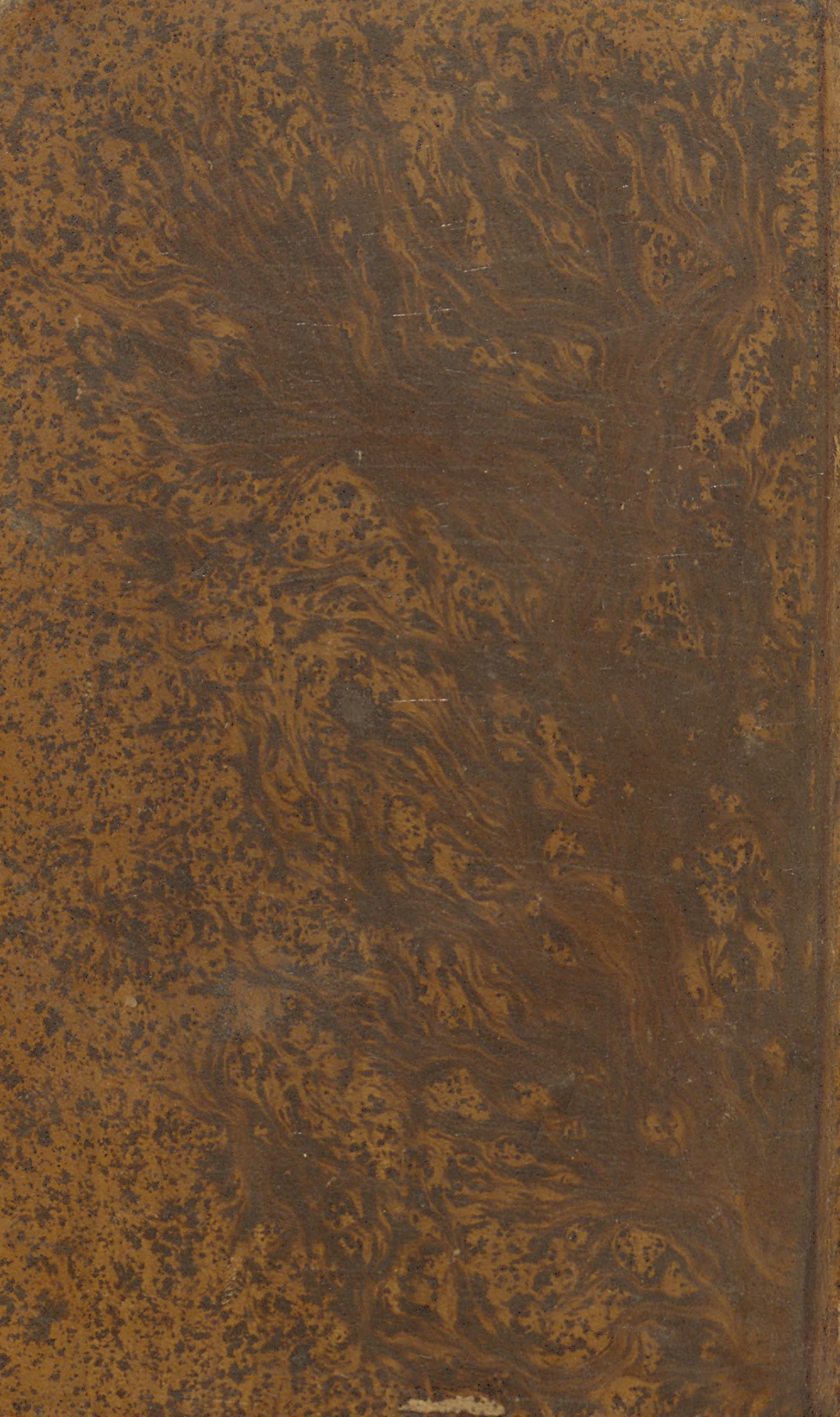

Fig. 121
Fig. 122
Fig. 123
Fig. 124
Fig. 125
Fig. 126
Fig. 127
Fig. 128
Fig. 129
Fig. 130
Fig. 131
Fig. 132
Fig. 133
Fig. 134
Fig. 135
Fig. 136
Fig. 137
Fig. 138
Fig. 139
Fig. 140
Fig. 141
Fig. 142
Fig. 143
Fig. 144
Fig. 145
Fig. 146
Fig. 147
Fig. 148







Biblioteca
UNIVERSIDAD DE SEVILLA
600704193
i 25923389



colorchecker CLASSIC

calibrite

mm